

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Signal, Images, Parole et Télécommunications**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Benoit OUDOMPHENG

Thèse dirigée par **Barbara NICOLAS**

préparée au sein du **Laboratoire Grenoble Images Parole Signal
Automatique (GIPSA-Lab)**

dans l'École Doctorale « **Electronique, Electrotechnique,
Automatique et Traitement du Signal (EEATS)** »

Localisation et contribution de sources acoustiques de navire au passage par traitement d'antenne réduite

Thèse soutenue publiquement le **3 Novembre 2015**,
devant le jury composé de :

Mr, Jérôme I., MARS

Professeur, GIPSA-Lab, Président

Mr, Yann, STEPHAN

Ingénieur de Recherche, SHOM, Rapporteur

Mr, Jean-Hugh, THOMAS

Maître de Conférences, LAUM, Rapporteur

Mr, Salah, BOURENNANE

Professeur, Institut Fresnel, Examineur

Mme, Sylvie, MARCOS

Directrice de Recherche, LSS, Examinatrice

Mr, Dominique, FATTACCIOLI

Expert acoustique sous-marine, DGA T.n., Invité

Mme, Barbara, NICOLAS

Chargée de Recherche, CREATIS, Directrice de thèse

Mme, Lucille, LAMOTTE

Directrice opérationnelle, MicrodB, Encadrante de thèse



UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES
ÉCOLE DOCTORALE EEATS
Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal

THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur en Sciences

de l'Université Grenoble Alpes

Mention : SIGNAL, IMAGES, PAROLE ET TÉLÉCOMMUNICATIONS

Présentée et soutenue par

Benoît OUDOMPHENG

**Localisation et contribution de sources acoustiques de navire au
passage par traitement d'antenne réduite**

Thèse dirigée par Barbara NICOLAS

préparée au laboratoire Grenoble Images Parole Signal Automatique
(GIPSA-Lab)

soutenue le 3 Novembre 2015

Jury :

<i>Président :</i>	Jérôme I. MARS	- GIPSA-Lab
<i>Rapporteurs :</i>	Yann STÉPHAN	- SHOM
	Jean-Hugh THOMAS	- LAUM
<i>Examineurs :</i>	Salah BOURENNANE	- Insitut Fresnel
	Sylvie MARCOS	- LSS
<i>Invité :</i>	Dominique FATTACCIOLI	- DGA Techniques Navales
<i>Directrice :</i>	Barbara NICOLAS	- CREATIS
<i>Encadrante :</i>	Lucille LAMOTTE	- MicrodB

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à remercier mes directrices de thèse, Barbara Nicolas et Lucille Lamotte, pour leurs conseils avisés, leur suivi et leur confiance. Merci Barbara pour ta franchise, ta disponibilité malgré toutes tes activités, ta rigueur, ta bonne humeur et surtout d’avoir pris le temps de relire autant de fois mes articles et mon manuscrit. Merci à Lucille pour la confiance que tu m’as accordé (ton premier doctorant), pour ta disponibilité malgré toutes tes responsabilités, nos longues discussions dans le train et surtout pour avoir relu jusqu’au bout mon manuscrit même en vacances.

Merci à la DGA Techniques navales pour m’avoir soutenu tant techniquement que matériellement tout au long de ma thèse. Merci de m’avoir fait découvrir ce bel environnement d’expérimentation qu’est le lac de Castillon et d’avoir réaliser les mesures en plein hiver alors que les températures étaient bien négatives.

Merci aux membres de mon jury d’avoir accepté d’évaluer mes travaux de thèse et pour leurs commentaires qui soulèvent de nombreuses perspectives à mes travaux. Merci à mes rapporteurs, Yann Stéphan et Jean-Hugh Thomas, à mes examinateurs, Salah Bourennane et Sylvie Marcos, à mon président Jérôme I. Mars. Enfin, merci à Dominique Fattaccioli qui bien qu’absent le jour de ma soutenance m’a fait confiance tout au long de ma thèse.

Je tiens à remercier tous les employés de la société MicrodB sans qui je n’aurais jamais pu mener à bien ma thèse. Merci à Arthur, Seb, Oliv et Christophe pour ces discussions scientifiques à révolutionner le monde du traitement d’antenne acoustique. Merci à Thibaud, Bruno et Fabien. Merci à Loïc pour m’avoir fait découvrir l’acoustique musicale au travers de la guitare et à Allan pour m’avoir fait découvrir l’escalade. Merci à Thibaut et Pierre pour votre soutien et pour nous avoir permis à tous les trois de bien réussir notre thèse.

Merci à mes collègues et amis du GIPSA-Lab pour m’avoir accueilli à bras ouverts à chaque fois que je venais au labo et pour ces vacances passées ensemble. Merci à Céline, Quentin, Pascal, Cindy, Manu, Raphaël, Alexis, Romain, Edouard, Aude, Robin, Guillaume, Timothée, Rémy, ... Un merci particulier à Céline et Quentin pour m’avoir toujours prêté leur canapé en cas de besoin. Merci Boris et Mai pour votre collaboration sur le projet ARMADA. Merci Jérôme, Dominique, Delphine, Bastien et le club nautique de Cholonge pour avoir permis la réalisation des expérimentations au lac de Laffrey qui m’ont permis de me former aux expérimentations en eau.

Merci à mes parents, mon frère, ma sœur et ma famille pour m'avoir soutenu même si le traitement d'antenne acoustique sous-marin reste encore un mystère pour vous.

Merci à mes amis normands pour m'avoir apporté votre amour au travers de tous ces moments passés ensemble. Vous m'avez permis de me changer les idées quand j'en avais besoin. Merci à Florent, Etienne, Caroline, Julie, Pauline et Benjamin.

Enfin, je m'excuse par avance si je vous ai oublié mais ce n'était pas volontaire. Je vous remercie tous pour votre soutien sous quelque forme que ce soit et pour votre aide tout au long de ces trois années de thèse.

Table des matières

Table des sigles et acronymes	vii
Listes des notations	ix
Introduction	1
1 Modélisation simplifiée du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface en mouvement	7
1.1 Introduction	8
1.2 Principales sources acoustiques sous-marines de navire en mouvement	8
1.2.1 Vibroacoustique et hydroacoustique	9
1.2.2 Classification des principales sources acoustiques sous-marines de bâtiment marin	10
1.2.3 Sources acoustiques sous-marines d'un navire de surface	11
1.2.4 Contributions énergétiques des différentes sources acoustiques	17
1.3 Modélisation simplifiée des sources acoustiques d'un navire de surface	23
1.3.1 Modélisation d'une source acoustique quelconque	24
1.3.2 Modélisation simplifiée d'une source hydroacoustique de propulseur	27
1.3.3 Modélisation simplifiée d'une source vibroacoustique associée aux sources internes	32
1.4 Modélisation simplifiée de la propagation acoustique sous-marine pour une source en mouvement	38
1.4.1 État de l'art	39
1.4.2 Réponse impulsionnelle du milieu de propagation acoustique	40
1.5 Proposition et simulation d'une configuration expérimentale réaliste	50
1.6 Conclusions	52

2	Méthodes d'imagerie acoustique de navire de surface au passage	55
2.1	Introduction	56
2.2	État de l'art	57
2.2.1	Méthodes de localisation et de contribution de sources acoustiques . .	59
2.2.2	Méthodes d'optimisation de géométrie d'antenne	66
2.2.3	Choix du système d'imagerie acoustique de navire de surface au passage	67
2.3	Méthode initiale : Formation de voies pour sources mobiles et déconvolution	70
2.3.1	Formation de voies pour sources mobiles	70
2.3.2	Performances de la formation de voies pour sources mobiles	77
2.3.3	Déconvolution de la formation de voies pour sources mobiles	91
2.3.4	Performances des méthodes de déconvolution de la formation de voies pour sources mobiles	99
2.3.5	Étude d'une configuration réaliste : Validation du choix de la méthode initiale pour cette étude	105
2.3.6	Conclusions	107
2.4	Améliorations de la localisation et de la contribution de sources mobiles . . .	108
2.4.1	Propositions d'améliorations de la méthode initiale	108
2.4.2	Pondération du Beamforming-MS	109
2.4.3	Antenne à ouverture synthétique	113
2.4.4	Correction de trajectographie par analyse des résultats de formation de voies	122
2.5	Conclusions	128
3	Études expérimentales	131
3.1	Objectifs des campagnes de mesure de bruit de passage	131
3.1.1	Expérimentations à échelle réduite et facteurs de similitude	132
3.1.2	Campagnes de mesures du projet ARMADA	133
3.2	Campagne de mesures aériennes : Salle semi-anéchoïque	135

3.2.1	Protocole expérimental	136
3.2.2	Caractérisation de l'installation	138
3.2.3	Caractérisation des performances de l'antenne	143
3.2.4	Résultats expérimentaux	145
3.2.5	Conclusions	151
3.3	Campagne de mesures sous-marines : Lac de Castillon	151
3.3.1	Protocole expérimental	152
3.3.2	Caractérisation de l'installation	156
3.3.3	Résultats expérimentaux	160
3.3.4	Conclusions	170
3.4	Conclusions et perspectives des expérimentations	170
Conclusion et perspectives		173
A Démonstration de l'équation (1.22)		179
B Effet du mouvement des sources sur le traitement d'antenne		181
C Sources acoustiques associées au mouvement de AMANDA		185
C.1	Revue bibliographique de la mesure de bruit de passage de navire de surface	186
C.1.1	Un projet de recherche	186
C.1.2	Liste des sources acoustiques théoriques	187
C.1.3	Localisation des sources de bruit de passage de maquettes de navire de surface	187
C.1.4	Comparaison des résultats de localisation avec les phénomènes hydrodynamiques en jeu	189
C.1.5	Lien avec le projet ARMADA	190
C.2	Étude acoustique du passage de la maquette AMANDA au lac de Castillon .	191
C.2.1	Rapport Signal Sur Bruit	191

C.2.2	Localisation des sources acoustiques associées au mouvement du navire	191
C.3	Conclusions et perspectives	196
Bibliographie		199

Table des sigles et acronymes

AIS	<i>Automatic Identification Systems</i>
AQUO	<i>Achieve QUIeter Oceans by shipping noise footprint reduction</i>
ARMADA	Antenne Réduite et Multi-Analyse pour la Discrétion Acoustique
DCSMM	Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin
DGA	Direction Générale de l'Armement
SONIC	<i>Suppression Of underwater Noise Indiced by Cavitation</i>
DAMAS	<i>Deconvolution Algorithm for the Mapping of Acoustic Sources</i>
DAMAS-MS	<i>Deconvolution Algorithm for the Mapping of Acoustic Sources for Moving Sources</i>
ETAM	<i>Extended Towed Array Method</i>
GIPSA-Lab	Grenoble Images Parole Signal et Automatique Laboratoire
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICP	<i>Integrated Cicuit Piezoelectric</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
NSWCCD	<i>Naval Surface Warfare Center - Crane Division</i>
RSB	Rapport Signal sur Bruit
SDM	<i>Source Density Modelling</i>

Listes des notations

Dans cette thèse, les fonctions scalaires seront notées en lettres non grasses telles que $psf(X_l, S_n, f)$. Pour cette fonction scalaire, les arguments entre parenthèses, *i.e.* X_l , S_n et f , représentent toutes les variables de la fonction scalaire psf . Les vecteurs sont notés en lettres minuscules grasses tels que $\mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)$. Pour ce vecteur, l'argument précédant le point virgule indique la dimension du vecteur, *i.e.* la dimension de $\mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)$ est $L \times 1$ qui est la dimension du vecteur \mathbf{x} , et les arguments suivant le point virgule, *i.e.* S_n et f , représentent toutes les variables du vecteur \mathbf{psf} . Les matrices sont notées en lettres majuscules grasses telles que $\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{s}; f)$. Pour cette matrice, les arguments précédant le point virgule indiquent la dimension de la matrice, *i.e.* la dimension de $\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{s}; f)$ est $L \times N$ où L et N sont les dimensions du vecteur \mathbf{x} et du vecteur \mathbf{s} , et l'argument suivant le point virgule, *i.e.* f , représente la variable de la matrice \mathbf{PSF} .

Modèles de sources acoustiques d'un navire

Modèles de sources ponctuelles

c		Célérité des ondes acoustiques en $m.s^{-1}$
ρ		Densité du fluide du milieu de propagation en $kg.m^{-3}$
N		Nombre de points source
\cdot_n		Relatif à la source S_n
S_n		Point correspondant à la n-ième source
\cdot_s		Relatif aux sources
\mathbf{s}		Vecteur des points source notés $S_n, n \in [1, N]$
$q(S_n, t)$		Débit acoustique d'une source monopolaire au point S_n en $m^3.s^{-1}$
$p_s(S_n, f)$		Pression rayonnée à 1 m d'une source au point S_n en Pa
$\mathbf{p}_s(\mathbf{s}; f)$	$N \times 1$	Vecteur contenant $p_s(S_n, f), n \in [1, N]$
$\Gamma_s(S_n, f)$		Autospectre de la pression rayonnée à 1 m d'une source en S_n
$\mathbf{\Gamma}_s(\mathbf{s}; f)$	$N \times 1$	Vecteur des autospectres des sources
$F(S_n, t)$		Force associée à une source dipolaire au point S_n en N
$\gamma_{nm'}(f)$		Fonction de cohérence entre deux sources S_n et $S_{n'}$ à la fréquence f

Modèle de propulseur

$[u_t, v_t, w_t]^T$	Variations de vitesses de convection de la turbulence en $m.s^{-1}$
T_u	Taux de turbulence
V_{flow}	Vitesse moyenne d'écoulement en $m.s^{-1}$
\vec{F}_p	Fluctuations de force de portance en N
$\phi_{w_t w_t}^K$	Autospectre des fluctuations de vitesses verticales de convection
K_x	Nombre d'onde longitudinal de la turbulence en m^{-1}
C	Corde d'une pale en m
U_c	Vitesse moyenne de convection des tourbillons en $m.s^{-1}$
Λ	Longueur de corrélation spatiale de la turbulence selon x en m

Modèle de coque

w_p	Déplacement vibratoire en m
v_p	Vitesse vibratoire en $m.s^{-1}$
k_x, k_y, k_z	Nombres d'ondes spatiaux selon x, y et z en m^{-1}
D	Opérateur de raideur en $Pa.m^3$
M_s	Masse surfacique de la plaque en $kg.m^{-2}$
E	Module de Young du matériau de la plaque en Pa
ν	Coefficient de Poisson du matériau de la plaque
ρ_{pla}	Densité du matériau de la plaque en $kg.m^{-3}$
\vec{F}_e	Force d'excitation ponctuelle de la plaque en N
$M_e(x_e, y_e, z_e)$	Point d'application de la force \vec{F}_e
$p_s(x, y, 0)$	Pression pariétale en Pa
a_{nm}	Amplitude modale du mode (n, m)
Φ_{nm}	Déformée modale du mode (n, m) en m
k_{nm}	Nombre d'onde spatial du mode (n, m) en m^{-1}
ω_{nm}	Pulsation du mode (n, m) en $rad.s^{-1}$
b	Dimension de la plaque selon x en m
d	Dimension de la plaque selon y en m
F_{nm}	Force généralisée associée au mode (n, m)
M_{nm}	Masse généralisée associée au mode (n, m)
Z_{pqnm}	Couplage intermodal entre (p, q) et (n, m) en $kg.m^{-2}.s^{-1}$

Propagation acoustique et méthodes d'imagerie acoustique

Temps et fréquence

t	Instant de réception
τ	Instant d'émission
f	Fréquence en Hz
$\omega = 2\pi f$	Pulsation en $rad.s^{-1}$
$\kappa = \frac{\omega}{c}$	Nombre d'onde en m^{-1}
$\lambda = \frac{c}{f}$	Longueur d'onde en m
Δf	Résolution fréquentielle en Hz
Δ_{dop}	Décalage de fréquences par effet Doppler en Hz
T_{acq}	Intervalle temporel d'acquisition
B_F	Bande fréquentielle des sources
k	Indice de bloc temporel
K	Nombre de blocs temporels indicés par k
T	Durée d'un bloc temporel
\cdot^k	Relatif au k -ième bloc temporel
t^k	Instant central du k -ième bloc de durée T

Mesures acoustiques

M	Nombre de points de mesure
\cdot_m	Relatif au point de mesure A_m
A_m	Point correspondant au m -ième point de mesure
\mathbf{a}	$M \times 1$ Vecteur des points de mesure notés $A_m, m \in [1, M]$
A_c	Centre de l'antenne
L_A	Envergure de l'antenne
\cdot_a	Relatif aux mesures de l'antenne
$\check{p}_a(A_m, t)$	Pression temporelle mesurée au point A_m en Pa
$\check{\mathbf{p}}_a(\mathbf{a}; t)$	$M \times 1$ Vecteur des pressions temporelles mesurées sur l'antenne, $\check{p}_a(A_m, t), \forall m \in [1, M]$
$\psi(A_m, t)$	Potentiel acoustique au point A_m en $Pa.s^{-1}$
$p_a(A_m, f)$	Spectre de pression mesurée au point A_m en Pa
$\mathbf{p}_a(\mathbf{a}; f)$	$M \times 1$ Vecteur contenant les spectres de pressions mesurées sur l'antenne, $p_a(A_m, f), \forall m \in [1, M]$
$\Gamma_a(A_m, f)$	Autospectre associé à $p_a(A_m, f)$
$\Gamma_a(\mathbf{a}; f)$	$M \times 1$ Vecteur contenant les autospectres $\Gamma_a(A_m, f), \forall m \in [1, M]$ des pressions mesurées sur l'antenne
$\mathbf{M}_a(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f)$	$M \times M$ Matrice interspectrale estimée de $\check{\mathbf{p}}_a(\mathbf{a}; t)$ à la fréquence f
$b(A_m, f)$	Spectre du bruit de mesure au capteur A_m en Pa
$\mathbf{b}(\mathbf{a}; f)$	$M \times 1$ Vecteur des spectres $b(A_m, f), m \in [1, M]$ sur l'antenne
$\Gamma_b(A_m, f)$	Autospectre du bruit de mesure en A_m
$\Gamma_b(\mathbf{a}; f)$	$M \times 1$ Vecteur des autospectres $\Gamma_b(A_m, f), m \in [1, M]$ sur l'antenne

Estimation des sources

L		Nombre de points de calcul
\cdot_l		Relatif au point focalisé X_l
X_l		Point correspondant au l-ième point de calcul
\mathbf{x}	$L \times 1$	Vecteur des points de calcul notés $X_l, l \in [1, L]$
\cdot_x		Relatif aux points de calcul
$\hat{p}_x(X_l, f)$		Estimée de l'amplitude d'une source équivalente au point X_l en Pa
$\hat{\mathbf{p}}_x(\mathbf{x}; f)$	$L \times 1$	Vecteur des amplitudes $\hat{p}_x(X_l, f), l \in [1, L]$ des sources équivalentes sur l'ensemble des points de calcul
$\hat{\Gamma}_x(X_l, f)$		Autospectre associé à $\hat{p}_x(X_l, f)$
$\hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)$	$L \times 1$	Vecteur des autospectres $\Gamma_x(X_l, f), l \in [1, L]$ des amplitudes des sources équivalentes sur l'ensemble des points de calcul
\cdot_{BF}		Relatif à la formation de voies pour sources mobiles
$p_{BF}(X_l, f)$		Spectre de pression calculée par Beamforming-MS en X_l en Pa
$\mathbf{p}_{BF}(\mathbf{x}; f)$	$L \times 1$	Vecteur des spectres $p_{BF}(X_l, f), \forall l \in [1, L]$ de pressions calculées par Beamforming-MS sur l'ensemble des points de calcul
$\Gamma_{BF}(X_l, f)$		Autospectre associé à $p_{BF}(X_l, f)$
$\Gamma_{BF}(\mathbf{x}; f)$	$L \times 1$	Vecteur des autospectres $\Gamma_{BF}(X_l, f), l \in [1, L]$ des pressions calculées par Beamforming-MS sur l'ensemble des points de calcul
$w_l(t)$		Pondération du Beamforming-MS pour le point X_l
ϵ_c		Erreur de célérité
$\epsilon_h(A_m)$		Erreur de positionnement du capteur en A_m selon x
$\epsilon_a(A_m)$		Erreur de calibration en amplitude du capteur en A_m
$\epsilon_\phi(A_m)$		Erreur de calibration en phase du capteur en A_m
ϵ_{rel}		Erreur relative de reconstruction par déconvolution
Z_n		Zone de contribution associée à la source en S_n

Transferts acoustiques entre deux pressions acoustiques

$\check{g}(A_m, t, S_n(\tau), \tau)$		Réponse impulsionnelle (RI) modèle de $S_n(\tau)$ à A_m
$g(A_m, S_n, f)$		Fonction de transfert (FT) modèle d'un point S_n à A_m
$\mathbf{g}(\mathbf{a}; S_n, f)$	$M \times 1$	Vecteur des FT $g(A_m, S_n, f), m \in [1, M]$ liant les points de l'antenne au point source S_n
$\mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{s}; f)$	$M \times N$	Matrice dont la n-ième colonne est le vecteur $\mathbf{g}(\mathbf{a}; S_n, f)$ de FT liées à la n-ième source
$g(A_m, X_l, f)$		Fonction de transfert modèle d'un point X_l à A_m
$\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)$	$M \times 1$	Vecteur des FT $g(A_m, X_l, f), m \in [1, M]$ liant les points de l'antenne au point de calcul X_l
$\mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{x}; f)$	$M \times L$	Matrice dont la l-ième colonne est le vecteur $\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)$ de FT liées au l-ième point de calcul
$psf(X_l, S_n, f)$		Réponse d'antenne (RA) évaluée en X_l et centrée en S_n
$\mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)$	$L \times 1$	Vecteur de la RA évaluée sur l'ensemble \mathbf{x} des points de calcul et centrée au point source $S_n, psf(X_l, S_n, f), \forall l \in [1, L]$
$\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{s}; f)$	$L \times N$	Matrice dont la n-ième colonne $\mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)$ est la RA évaluée sur l'ensemble \mathbf{x} des points de calcul et centrée au point source S_n
$psf(X_l, X_n, f)$		Réponse d'antenne évaluée en X_l et centrée en X_n
$\mathbf{psf}(\mathbf{x}, X_n; f)$	$L \times 1$	Vecteur de la RA évaluée sur l'ensemble \mathbf{x} des points de calcul et centrée au point de calcul X_n
$\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)$	$L \times L$	Matrice dont la n-ième colonne $\mathbf{psf}(\mathbf{x}; X_n, f)$ est la RA évaluée sur l'ensemble \mathbf{x} des points de calcul et centrée au point de calcul X_l
$\tilde{g}(A_m, S_n, f)$		Fonction de transfert réelle de S_n à A_m
$\tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{a}; S_n, f)$	$M \times 1$	Vecteur de FT mesurées d'un point S_n à un ensemble \mathbf{a}
$\mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f)$	$M \times 1$	Vecteur de projection entre les capteurs \mathbf{a} et le point X_l

Paramètres de la méthode initiale

$\cdot_{\text{moy}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \cdot(k)$	Moyenne statistique sur K blocs temporels
$\widetilde{\mathbf{M}}$	Matrice \mathbf{M} avec erreurs de modèle

Paramètres des améliorations

\cdot_{ref}	Relatif à la pondération proposée dans la section 2.4
V_m	m-ième capteur virtuel de l'antenne synthétique
$\check{p}_v(V_m, t)$	Pression temporelle mesurée au point V_m en Pa
\cdot_r	Capteur en recouvrement
ΔX	Distance associée à la construction des capteurs virtuels
ζ_0	Retard associé à la construction des capteurs virtuels
ζ	Retard associé à la synchronisation des signaux virtuels
$\text{Corr}(\cdot)$	Opérateur d'intercorrélation
\mathbf{M}_D	Matrice des décalages en nombre d'échantillons
\mathbf{M}_B	Version binaire de la matrice des décalages
\mathbb{F}	Bande des fréquences les plus énergétiques des sources
$\cdot(\mathbb{F})$	Relatif à la bande fréquentielle \mathbb{F}
\mathfrak{D}	Distance du critère de voisinage en mètres
$x_{\text{traj}}(t)$	Abscisse de la trajectoire <i>a priori</i> des sources en mètres
$\hat{x}_{\text{traj}}(t)$	Abscisse de la trajectoire corrigée des sources en mètres

Paramètres géométriques

$d_{ml}(t)$	Distance entre le point A_m et le point $X_l(t)$ à l'instant t
$d_{cl}(t)$	Distance entre le point A_c et le point $X_l(t)$ à l'instant t
$r_{mn}(t)$	Distance entre le point A_m et le point $S_n(t)$ à l'instant t
$\overrightarrow{u_x}$	Vecteur directeur unitaire de l'axe x
$\overrightarrow{u_y}$	Vecteur directeur unitaire de l'axe y
$\overrightarrow{u_z}$	Vecteur directeur unitaire de l'axe z

Notations mathématiques

Opérateurs mathématiques

$\text{div}[\cdot] = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$	Divergence
$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$	Laplacien
$\langle \cdot \rangle$	Moyenne temporelle d'un signal
$\mathcal{F}[\cdot]$	Transformée de Fourier
$\mathbb{E}[\cdot]$	Espérance mathématique
$\mathcal{Re}[\cdot]$	Partie réelle d'un nombre complexe
$H_n^{(\xi)}$	Fonction de Hankel d'ordre n de ξ -ième espèce
$\text{trace}(\mathbf{M})$	Trace d'une matrice \mathbf{M}
$\text{diag}(\mathbf{M})$	Diagonale d'une matrice \mathbf{M}
$\text{diag}[X_l]_{l=1}^L$	Matrice diagonale dont la diagonale est $[X_1, \dots, X_L]$
$\text{cond}(\mathbf{M})$	Nombre de conditionnement d'une matrice \mathbf{M}
$\delta(\cdot)$	Fonction Dirac

Arguments, exposants et indices

\cdot^H	Transposée hermitienne de matrice
\cdot^*	Opérateur de conjugaison d'un nombre complexe
$\cdot(\alpha, \beta)$	Élément d'indice (α, β) d'une matrice
\cdot_{diag}	Diagonale d'une matrice

Notations diverses

$j = \sqrt{-1}$	Nombre complexe
λ_{reg}^2	Paramètre de régularisation
\mathbf{I}	Matrice identité
$\mathcal{N}(\mu, \sigma)$	Loi normale de moyenne μ et d'écart-type σ
$\phi(p(A_m, f))$	Phase du spectre $p(A_m, f)$ mesuré au point A_m

Normes

$\ \cdot\ _p = \sqrt[p]{\sum_{\alpha} \cdot(\alpha) ^p}$	Norme $L_p, p \geq 1$
$\ \cdot\ _F = \sqrt{\sum_{\alpha} \sum_{\beta} \cdot(\alpha, \beta) ^2}$	Norme de Froebenius

Introduction

Avec le développement du commerce mondial au cours des dernières années et l'industrialisation des pays asiatiques fortement peuplés, le secteur des transports s'est développé fortement dans les domaines maritime, terrestre et aérien. Cette recrudescence soulève des problèmes de consommation énergétique mais également de pollution atmosphérique relative à la présence de particules et de gaz nocif dans l'air. L'impact environnemental du secteur des transports est également de nature acoustique, on parle désormais de *pollution sonore* et la préservation du paysage acoustique est au cœur des préoccupations des industries du transport. Cette pollution sonore est relative aux niveaux d'émissions sonores des véhicules qui peuvent nuire à la santé des humains mais également de tous les êtres vivants sur Terre. La régulation de la pollution acoustique des transports est intégrée dans plusieurs normes internationales mises en place par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) dans le domaine automobile [ISO 1990, ISO 2007, ISO 2009c, ISO 2015], dans le domaine aérien [ISO 2004, ISO 2009b], dans le domaine ferroviaire [ISO 2013] et dans le domaine naval [ISO 2008, ISO 2009a, ISO 2012, ISO 2014]. Ces normes en vigueur ou en cours d'élaboration visent à définir des méthodes de mesures du bruit rayonné par les véhicules de transport au passage et à spécifier des seuils maximaux de niveaux de pression acoustique rayonnée à ne pas dépasser. Afin de respecter ces normes, les constructeurs de véhicules de transport intègrent des contraintes acoustiques dans leur procédure qualité en phase de prototypage, de conception et de mise en circulation.

Étude du bruit rayonné par un véhicule au passage

L'étude du bruit de passage de véhicule à l'aide d'une antenne acoustique a connu de nombreux développements au cours des dernières années. Les normes actuelles préconisent des mesures mono-capteur, délivrant une mesure du spectre global de pression rayonnée, en un point de mesure en champ lointain du véhicule de transport au passage. De telles mesures mono-capteur présentent un intérêt de certification de véhicule mais n'aident pas au diagnostic en vue d'une procédure de réduction de bruit rayonné. Au contraire, les méthodes de traitement d'antenne analysant le bruit de passage ont pour objectif d'établir une *cartographie acoustique* du véhicule en vue d'identifier les *sources acoustiques* d'un véhicule. Ces sources correspondent aux zones d'émissions acoustiques du véhicule qui sont générées par un phénomène mécanique ou hydrodynamique. Ainsi, plusieurs travaux de recherches sur des méthodes de traitement d'antenne dédiées au bruit de passage ont été publiés dans le domaine ferroviaire [Barsikow 1987, Poisson 1996, Bruhl 2000, Mellet 2006, LeCourtois 2012], dans le domaine automobile [Kook 2000] et dans le domaine aéronautique [Mueller 2002, Brusniak 2006, Siller 2010, Fleury 2011, Sijtsma 2012]. Ces méthodes sont nombreuses dans la littérature du domaine acoustique aérien mais inexistantes dans la littérature pour la mesure acoustique sous-marine du bruit de passage de navire. La figure 1 donne un exemple

de configuration expérimentale déployée pour l'étude du bruit de passage d'un avion avec une antenne plane de microphones instrumentée au sol.



FIGURE 1 – Exemple de configuration expérimentale pour l'étude du bruit de passage d'un avion avec une antenne plane de microphones au sol. Figure extraite de l'article de Siller *et al.* [Siller 2010].

Ces études par antennerie permettent donc d'accéder à une information de localisation des sources acoustiques et de contribution de ces sources acoustiques à la signature acoustique globale du véhicule. Ces informations sont utiles au constructeur de véhicule puisqu'elles lui permettent d'identifier l'élément physique du véhicule qui rayonne le plus grand niveau de pression acoustique et donc qui est l'élément produisant la plus grande nuisance sonore. La figure 2a donne un exemple de définition de zones sources dans la cartographie acoustique d'un avion. La figure 2b présente une estimation des contributions de chaque zone source correspondant à un élément physique de l'avion, ces résultats ont été publiés dans l'article de Fleury *et al.* [Fleury 2011]. Dans ce cas, les résultats montrent que la principale composante large bande (en rose) du bruit rayonné par cet avion est produite par le moteur (*engines*) et que les sources acoustiques des ailes (*wing-tips* en rouge et *wing-center* en bleu foncé) contribuent à la composante bande étroite du bruit rayonné par l'avion au vu des spectres en trait rouge et trait bleu, sur la figure 2b. Pour réduire le bruit rayonné par cet avion, le constructeur étudiera donc la source acoustique de moteur pour la composante large bande et les sources acoustiques des ailes pour les composantes bande étroite.

Enjeux scientifiques pour le domaine maritime

Les transports maritimes sont également de nombreuses sources de pollution environnementale, notamment de pollution sonore. En effet, en milieu sous-marin, les ondes acoustiques se propagent à de longues distances du fait de la faible atténuation de propagation. Ainsi, les sources acoustiques de navires telles que celles générées par les machines internes, le propulseur et l'hydrodynamique génèrent un champ de pression acoustique sous-marin de fort niveau et de longue portée notamment pour les basses fréquences. Ces niveaux de bruit rayonné deviennent une problématique majeure pour l'environnement, en particulier pour la faune sous-marine dans les zones littorales.

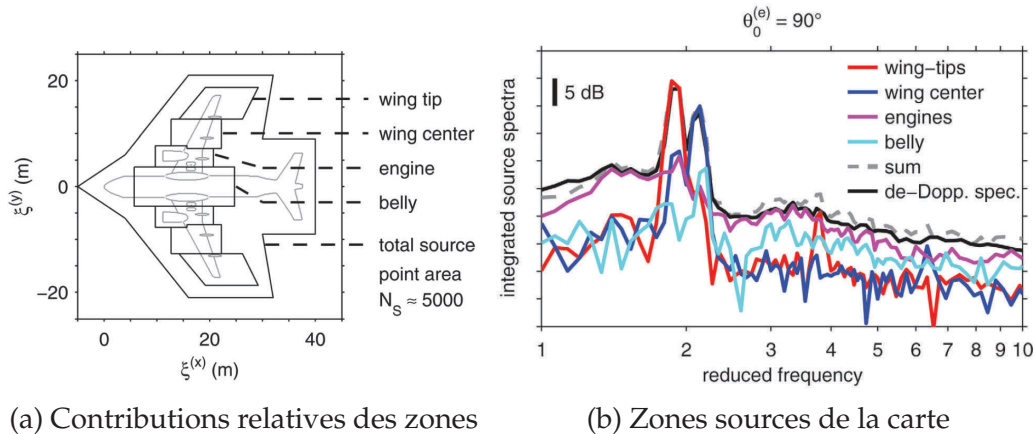


FIGURE 2 – Définition de zones sources correspondant à des éléments physiques d'un avion au passage (a) et estimation de la contribution énergétique de chaque source dans la signature acoustique globale (b). Extrait de l'article de Fleury *et al.* [Fleury 2011].

Dans ce contexte, la Commission Européenne a adopté la Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin le 17 Juin 2008 (DCSMM) [Directive 2008]. Cette directive-cadre préconise aux acteurs navals de prendre des mesures pour limiter le bruit rayonné par le trafic maritime dans les zones littorales (paragraphe 11) et pour surveiller les bandes de tiers d'octave de fréquences centrales 63 Hz et 125 Hz. Ces bandes de tiers d'octave contiennent des fréquences qui possèdent une longue portée et correspondent aux fréquences les plus énergétiques du bruit rayonné par la plupart des grands navires. Les préconisations de la DCSMM motivent le développement de différents types de méthodes :

- des méthodes pour la surveillance du bruit rayonné par les navires en zones littorales, à l'échelle du trafic maritime
- des méthodes de réduction du bruit rayonné par les navires de surface
- des méthodes pour la mesure de la signature acoustique d'un navire au passage

À l'échelle du trafic maritime, des outils de prédiction du bruit rayonné par le trafic maritime dans des zones côtières ont été développés au cours de ces dernières années dans le cadre de la DCSMM. Par exemple, la société Quiet-Oceans propose un outil de prédiction statistique du bruit rayonné par le trafic maritime, Quonops © [Folegot 2012], dans l'objectif de surveiller les niveaux de pression acoustique rayonnée par le trafic maritime dans les zones littorales. Dans la même idée, le logiciel Listen-to-the-Deep-Ocean © (LIDO) du laboratoire de bioacoustique de Catalogne est un outil de prédiction permettant d'évaluer l'impact du bruit de trafic maritime sur la faune bioacoustique [André 2011]. Ces outils de prédiction à l'échelle du trafic maritime permettent donc de répondre au besoin de surveillance acoustique des zones littorales.

À l'échelle individuelle d'un navire, des premiers travaux ont été réalisés à l'échelle européenne concernant les méthodes de réduction du bruit rayonné par les navires. Le projet collaboratif européen *Suppression Of underwater Noise Induced by Cavitation* (SONIC) a permis de financer des recherches sur des méthodes de réduction du bruit rayonné par la cavitation

d'un propulseur de navire de surface. Dans ce projet de recherche, un propulseur a été étudié individuellement dans un tunnel hydrodynamique afin de caractériser son rayonnement acoustique.

De plus, un second projet collaboratif européen *Achieve Quieter by shipping nOise footprint reduction* (AQUO) [Audoly 2014] a également contribué à l'évaluation du bruit rayonné par le trafic maritime ainsi que son impact sur l'environnement marin. Au cours de ce projet, un modèle paramétrique de gabarit de spectre de bruit rayonné par un navire de surface a été proposé pour analyser la composition de la signature acoustique.

Concernant la mesure de la signature acoustique d'un navire au passage, des normes de mesures mono-capteur pour définir des méthodes de mesure de la signature acoustique d'un navire de surface au passage existent [ASA 2009] ou sont en cours d'élaboration [ISO 2012, ISO 2014]. Ces mesures mono-capteur permettent d'attester du niveau de pression acoustique rayonné par le navire en vue d'une certification mais ne permettent pas de fournir de diagnostic acoustique pour la réduction du bruit rayonné.

Ainsi, des premières solutions ont été proposées pour répondre aux préconisations de la Communauté Européenne. Des outils de prédiction numériques permettent d'attester de niveaux globaux de pression acoustique rayonné par le trafic maritime dans les zones littorales. Des méthodes de réduction du bruit rayonné par les navires ont été proposées notamment pour réduire le bruit lié à la cavitation des propulseurs. Des premières méthodes de mesures mono-hydrophones de signatures acoustiques de navire sont proposées mais ne permettent pas une discrimination spatiale des sources.

Caractérisation de sources et traitement d'antenne

Pour pallier ce manque, des mesures par antennes acoustiques associées à des traitements dédiés permettraient d'avoir des informations de localisation de sources et de contribution de sources. Ces informations seraient utiles au **diagnostic en vue d'une réduction du bruit rayonné** par un navire, comme il l'est pratiqué pour les véhicules terrestres et aériens. Des premiers résultats de localisation de sources ont été publiés par De Jong *et al.* concernant des mesures du bruit de passage d'une maquette de frégate d'environ 10 mètres de long dans le bassin des carènes de la société MARIN à des vitesses inférieures à $3m.s^{-1}$. Ces mesures ont été réalisées avec une antenne linéaire d'hydrophones et les résultats de localisation bien que limités en résolution sont prometteurs [Jong 2009].

Outre le fait d'aider au diagnostic acoustique, l'information de localisation des sources et de contribution des sources est utile à la **validation de modèles de simulation numérique**. Enfin, un dernier intérêt scientifique des méthodes de traitement d'antenne est que ces méthodes expérimentales permettent aux acousticiens du domaine naval de **comprendre des phénomènes complexes de rayonnement acoustique** qui ne sont actuellement pas modélisés. En effet, de nombreuses sources acoustiques existent au niveau d'un navire de surface et ces sources interagissent souvent entre elles. Les méthodes de traitement d'antenne permettent de localiser et d'estimer la contribution des sources permettant ainsi de décomposer la signature acoustique du navire. Par exemple, les sources acoustiques encore mal connues

théoriquement sont celles associées à la brisure de la vague d'étrave [Jong 2009] ou à la brisure des bulles de cavitation [Kuiper 1981].

De nombreuses recherches sont donc encore nécessaires dans le domaine du traitement d'antenne pour l'analyse du bruit de passage de navire de surface.

Dans ce contexte, le projet *Antenne Réduite Multi-Analyse pour la Discrétion Acoustique* (ARMADA) a été proposé et financé par le Régime d'Appui Pour l'Innovation Duale (RAPID) de la Direction Générale de l'Armement (DGA). Le projet ARMADA a été réalisé en collaboration entre la société MicrodB du groupe VibraTec et le laboratoire GIPSA-Lab. La dualité de ce projet se traduit par le développement d'un procédé industriel de mesure par antenne acoustique :

- dans un objectif civil de caractérisation de sources acoustiques sous-marines d'une infrastructure sous-marine ou d'un navire civil,
- dans un objectif militaire de caractérisation de la signature acoustique sous-marine d'un navire pour la discrétion acoustique.

Les méthodes de caractérisation de sources développées dans ce projet sont des méthodes de localisation, de contribution et de séparation de sources.

Objectifs de la thèse

Ma thèse s'inscrit dans le cadre du projet ARMADA et dispose d'un financement CIFRE-Défense de la DGA.

Le principal objectif de ma thèse est de proposer une méthode de traitement d'antenne pour l'estimation de la **localisation et de la contribution de sources acoustiques sous-marines de navire de surface en mouvement**. Pour atteindre cet objectif, le mouvement du navire doit être pris en compte dans les traitements géométriquement et acoustiquement. De plus, dans l'application visée, une antenne réduite de 9 hydrophones sera utilisée. Les méthodes développées devront donc prendre en compte cette contrainte d'antenne réduite.

Le second objectif de cette thèse est de **dimensionner une expérimentation de mesure de bruit de passage de navire de surface** permettant de valider les méthodes proposées. Un démonstrateur devra donc être conçu et validé expérimentalement avec l'étude d'un navire de surface au passage au-dessus d'une petite antenne d'hydrophones au Site d'Essais Sonar et Acoustique du lac de Castillon (SESAC) appartenant à la DGA. Ces expérimentations au lac de Castillon permettront de valider les estimations de localisation et de contribution des sources et fourniront des données expérimentales nouvelles dans le domaine naval publique.

Organisation de la thèse

Le chapitre 1 présente une étude bibliographique du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface et propose une modélisation simple et analytique d'un navire de surface à partir de quelques sources typiques. De plus, dans cette partie, la modélisation de la propagation acoustique sous-marine selon la théorie des rayons pour une source en mouvement est présentée. La modélisation de quelques sources et de la propagation acoustique a permis la construction d'un simulateur de rayonnement acoustique de navire, générant des pressions temporelles mesurées au niveau des hydrophones d'une antenne de mesure. Ce simulateur a été utilisé pour valider les méthodes de localisation-contribution de sources proposées dans cette thèse.

Le chapitre 2 présente la méthode initiale de localisation de sources et de contribution de sources construite à partir des méthodes de la littérature. Cette partie présente également les différentes améliorations de la méthode initiale proposées au cours de cette thèse. Les performances en localisation et en contribution de sources de la méthode initiale et de ses améliorations sont évaluées sur des données issues du simulateur précédent.

Le chapitre 3 présente deux campagnes de mesures de validation des méthodes de localisation-contribution de sources développées au cours de cette thèse. La première campagne de mesures est une expérience aérienne simple de tractage de mobile sur un rail de guidage parallèlement à une antenne linéaire de microphones. La seconde campagne de mesures est une expérience de tractage de maquette de navire de surface parallèlement à une antenne linéaire d'hydrophones immergée. Cette dernière campagne a été réalisée au site d'essais acoustiques de la DGA au lac de Castillon en 2015.

Modélisation simplifiée du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface en mouvement

Sommaire

1.1	Introduction	8
1.2	Principales sources acoustiques sous-marines de navire en mouvement . . .	8
1.2.1	Vibroacoustique et hydroacoustique	9
1.2.2	Classification des principales sources acoustiques sous-marines de bâtiment marin	10
1.2.3	Sources acoustiques sous-marines d'un navire de surface	11
1.2.3.1	Sources acoustiques de propulseur	12
1.2.3.2	Sources vibroacoustiques associées aux sources internes	14
1.2.3.3	Sources associées au mouvement du navire	15
1.2.3.4	Composition de la signature acoustique sous-marine d'un navire en mouvement	17
1.2.4	Contributions énergétiques des différentes sources acoustiques	17
1.3	Modélisation simplifiée des sources acoustiques d'un navire de surface . . .	23
1.3.1	Modélisation d'une source acoustique quelconque	24
1.3.1.1	Source acoustique de volume quelconque	24
1.3.1.2	Source acoustique ponctuelle	25
1.3.2	Modélisation simplifiée d'une source hydroacoustique de propulseur .	27
1.3.2.1	Source de bruit d'impact d'un bord d'attaque de pale avec la turbulence	27
1.3.2.2	Simulation d'une source de bruit de bord d'attaque de pale . .	31
1.3.3	Modélisation simplifiée d'une source vibroacoustique associée aux sources internes	32
1.3.3.1	Modélisation de la réponse vibratoire d'une plaque finie, simplement appuyée et non bafflée	33
1.3.3.2	Simulation d'une plaque vibrante	37
1.4	Modélisation simplifiée de la propagation acoustique sous-marine pour une source en mouvement	38
1.4.1	État de l'art	39
1.4.2	Réponse impulsionnelle du milieu de propagation acoustique	40
1.4.2.1	Géométrie du problème de propagation : Hypothèses d'étude	41

1.4.2.2	Prise en compte de la mobilité des sources	42
1.4.2.3	Présence d'interfaces réfléchissantes entre deux milieux homogènes	47
1.4.2.4	Implémentation du simulateur de propagation	49
1.5	Proposition et simulation d'une configuration expérimentale réaliste	50
1.6	Conclusions	52

1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de construire un simulateur du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface en mouvement en modélisant mathématiquement les sources acoustiques sous-marines de celui-ci. Les *sources acoustiques* désignent des éléments physiques du navire dont le rayonnement acoustique contribue à la signature acoustique du navire. Ce simulateur servira à l'évaluation des performances de méthodes de localisation de sources et d'estimation de la contribution énergétique de chacune de ces sources dans la signature acoustique du navire. De plus, il sera également utile au dimensionnement d'une expérience de mesure de bruit de passage d'une maquette de navire de surface. Ainsi, il est nécessaire de mener une étude bibliographique pour identifier les sources acoustiques de navire de surface qui contribuent principalement à sa signature acoustique et ne modéliser que celles-ci.

Tout d'abord, une étude bibliographique a été réalisée pour identifier les principales sources acoustiques sous-marines d'un navire de surface en mouvement, elle est présentée dans la section 1.2. Puis, la section 1.3 introduit la stratégie de modélisation analytique simplifiée d'une plaque mince vibrante représentant la coque et d'une source acoustique de pale de propulseur. Dans la section 1.4, une modélisation simplifiée de la propagation des ondes acoustiques sans interaction avec le fond et pour une source en mouvement est présentée. Enfin, la simulation d'une configuration réaliste de sources représentant un navire de surface est présentée dans la partie 1.5 et comparée au spectre du bruit rayonné par un navire disponible dans la littérature.

1.2 Principales sources acoustiques sous-marines de navire en mouvement

Cette section présente une description générale du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface qui est décomposé en sources acoustiques. Tout d'abord, les notions de sources vibroacoustiques et de sources hydroacoustiques sont définies. Ensuite, nous proposons de diviser l'étude du bruit rayonné par un navire en trois familles de sources acoustiques sous-marines au travers d'une étude bibliographique. Les principales sources

sont ensuite listées et classées suivant ces trois familles. Enfin, à partir des quelques données expérimentales de signatures acoustiques de navire disponibles dans la littérature, une synthèse bibliographique est réalisée pour conclure sur la composition de la signature acoustique sous-marine d'un navire de surface et sur les propriétés spatiales et fréquentielles des différentes sources.

1.2.1 Vibroacoustique et hydroacoustique

Le rayonnement acoustique sous-marin des navires de surface résulte d'un grand nombre de sources acoustiques sous-marines équivalentes. Globalement, deux principaux types de sources acoustiques existent : les sources vibroacoustiques et les sources hydroacoustiques.

Les **sources vibroacoustiques** désignent les zones physiques du navire qui rayonnent des ondes acoustiques induites par les vibrations d'une structure du navire, comme par exemple la coque. Les vibrations d'une structure correspondent mécaniquement aux déplacements des différents points de la structure, elles sont régies par l'équation du mouvement dont le terme d'excitation peut être :

- mécanique : une force est exercée en un point de la structure ou des vibrations sont transmises par une seconde structure vibrante,
- acoustique : impact d'une onde acoustique
- hydrodynamique : pression pariétale générée par un écoulement sur la peau de la structure vibrante.

Le champ de pression acoustique est ensuite calculé en utilisant la propriété de continuité de la vitesse vibratoire normale avec la vitesse particulière acoustique normale au niveau de la peau de la structure vibrante, l'équation de Helmholtz permet de calculer ce champ acoustique [Morse 1968, Lesueur 1988, Williams 1999]. La figure 1.1 schématise les différentes sources d'excitation d'une structure vibrante ainsi que les différentes réponses possibles de la structure.

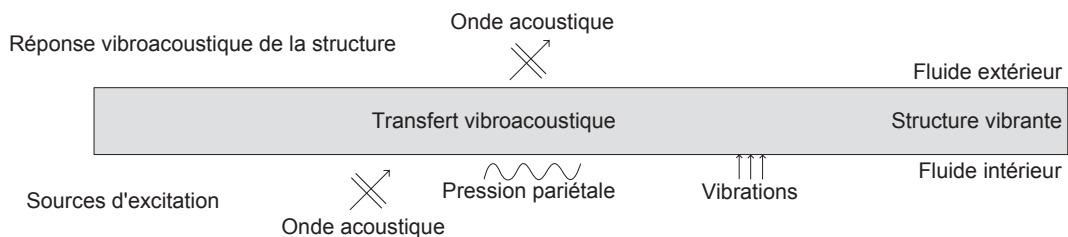


FIGURE 1.1 – Schéma des sources de rayonnement vibroacoustiques d'une structure vibrante.

Les **sources hydroacoustiques** désignent les zones du navire qui sont le siège d'interactions entre une structure du navire en mouvement et le fluide environnant qui produisent des ondes acoustiques se propageant dans le fluide. Ces interactions sont qualifiées d'*excitations hydrodynamiques* et sont de différents types : impact d'écoulement sur

un objet, lâchers tourbillonnaires à l'extrémité d'un objet dans un écoulement, transition d'un écoulement laminaire en un écoulement turbulent à la surface d'un objet. Ces excitations hydrodynamiques sont calculées à partir des équations de la mécanique des fluides (équation de Navier-Stokes, équation d'Euler). Le champ de pression acoustique produit par ces excitations hydrodynamiques est modélisé par les analogies acoustiques de Lighthill [Lighthill 1952], de Curle [Curle 1955] et Ffowcs-Williams et Hawkings [Williams 1969]. Ces analogies acoustiques consistent à découpler les termes hydrodynamiques des termes acoustiques en linéarisant les équations de la mécanique des fluides. La figure 1.2 schématise quelques excitations hydrodynamiques auxquelles est soumis un objet dans un écoulement turbulent.

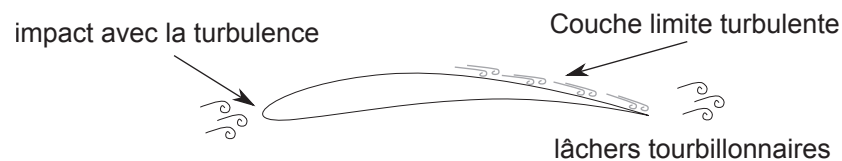


FIGURE 1.2 – Schéma des sources de rayonnement hydroacoustiques d'un objet soumis à un écoulement turbulent.

1.2.2 Classification des principales sources acoustiques sous-marines de bâtiment marin

Des études expérimentales ont été menées sur des navires civils, particulièrement des navires de recherche, afin d'étudier la signature acoustique globale des navires de surface et les différentes sources qui la composent. Arveson et Vendittis ont réalisé des mesures acoustiques d'un navire cargo à différentes vitesses, ils ont validé la présence de raies fréquentielles et de leurs harmoniques dans la signature acoustique du navire aux fréquences caractéristiques du type de propulseur et du moteur diesel [Arveson 2000]. Wales et Heitmeyer [Wales 2002] ont réalisé une étude statistique pour dresser un spectre moyen de bruit rayonné par le trafic maritime. Une étude similaire sur différents types de navire au passage dans une zone a été conduite par Gervaise *et al.* pour mesurer les niveaux moyens de pression acoustique rayonnée par les navires en champ lointain à des fins d'évaluation d'impact sur les mammifères marins [Gervaise 2012]. De récents projets de recherche européens ont fait l'objet de mesures de signature acoustique de navires de surface afin de préconiser des méthodes de réduction du bruit rayonné. Le projet FP7 SONIC, *Suppression Of underwater Noise Induced by Cavitation*, concerne l'étude du bruit rayonné par la cavitation des navires de surface et des solutions de réduction du niveau de ce bruit. Ce projet a montré une bonne adéquation entre les outils numériques de prédiction du bruit de cavitation et les observations expérimentales d'un propulseur cavitant [Firenze 2015, Lafeber 2015]. Le projet FP7 AQUO, *Achieve Quieter Oceans by shipping noise footprint reduction*, a pour objectif d'étudier l'impact du bruit rayonné par le trafic maritime et de proposer des recommandations pour la réduction du bruit rayonné d'un navire de surface à l'échelle individuelle. Le projet AQUO a fait l'objet de campagnes de mesures de signature acoustique de différents navires

de surface en respectant les préconisations de la norme américaine [ASA 2009]. Un modèle paramétrique de signature acoustique de navire a été proposé et appliqué à la campagne de mesures en vue d'estimer la contribution énergétique de trois types de sources dans la signature acoustique mesurée par un hydrophone [Audoly 2014]. Les trois composantes identifiées dans la signature acoustique sont le bruit relatif au propulseur sans cavitation, le bruit relatif à la cavitation du propulseur et le bruit relatif aux machines internes.

D'après ces études expérimentales, différents types d'éléments physiques d'un navire de surface rayonnent donc un champ de pression acoustique. Afin de structurer la présente étude de la signature acoustique d'un navire de surface, trois familles de sources acoustiques sous-marines, similaires à celles du projet AQUO, sont proposées dans ce chapitre. Ces familles, ou classes de sources, sont définies selon leur origine physique, vibroacoustique ou hydroacoustique, et rattachées à des composants mécaniques d'un navire de surface. Ces familles sont les suivantes :

- les sources acoustiques de propulseur,
- les sources vibroacoustiques associées aux sources internes de la carène,
- les sources vibroacoustiques et hydroacoustiques associées au mouvement du navire dans l'eau.

La *carène* désigne la partie immergée de la coque du navire de surface. La figure 1.3 liste les différentes sources vibroacoustiques qui sont notées (V) et hydroacoustiques qui sont notées (H) d'un navire de surface en mouvement suivant la classification établie.

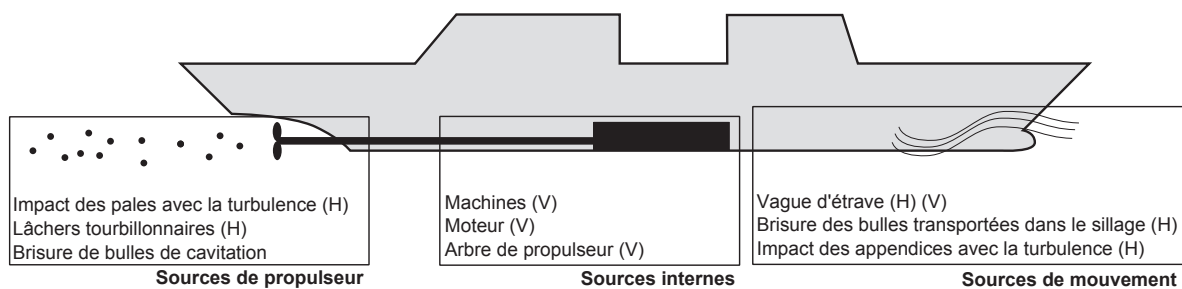


FIGURE 1.3 – Classification des sources acoustiques de bâtiment marin selon leurs origines physiques

1.2.3 Sources acoustiques sous-marines d'un navire de surface

Dans la littérature, plusieurs ouvrages recensent les sources acoustiques contribuant au rayonnement acoustique des navires de surface. L'ouvrage de Ross présente généralement des équations pour modéliser simplement les sources acoustiques sous-marines composant majoritairement le rayonnement acoustique d'un bâtiment marin [Ross 1976], il donne en particulier des modèles simples pour modéliser le bruit de cavitation et propose un gabarit de bruit de fond marin lié au trafic maritime. Blake recense de façon exhaustive et détaille les modèles mathématiques des principales sources vibroacoustiques et hydroacoustiques d'un navire de surface [Blake 1984]. L'ouvrage de Skelton et James met en équation

et décrit les différentes sources vibroacoustiques en milieu sous-marin en tenant compte du fort couplage vibroacoustique induit par l'importante densité de l'eau [Skelton 1997]. Enfin, l'ouvrage de référence de Breslin, concentré sur l'hydrodynamique des propulseurs de bâtiments marins, modélise les différents phénomènes hydrodynamiques (interaction avec la turbulence, cavitation), ces informations sont utiles pour l'évaluation des performances des propulseurs mais également pour modéliser a posteriori l'acoustique rayonné par un propulseur [Breslin 1996].

Dans cette sous-section, une liste des principales sources acoustiques sous-marines d'un navire de surface est dressée à partir des ouvrages de référence cités ci-dessus. L'étude de ces ouvrages montre que toutes les sources acoustiques de bâtiment marin sont de nature hydroacoustique (influence du fluide sur la structure, etc) ou de nature vibroacoustique (rayonnement de carène, etc) qui sont des notions décrites dans la sous-section 1.2.1. Le recensement des sources est structuré par les trois familles de sources représentées sur la figure 1.3.

1.2.3.1 Sources acoustiques de propulseur

Les sources de propulseur sont majoritairement hydroacoustiques, la figure 1.4 présente schématiquement les différents éléments physiques du propulseur associés à ces sources. Le nombre important d'excitations hydrodynamiques existant au niveau d'un propulseur et le couplage entre ces phénomènes font que les études théoriques et expérimentales s'intéressent en premier lieu au cas d'une pale considérée comme un profil hydrodynamique dans un écoulement [Barker 1976]. Les sources acoustiques de bord d'attaque comme l'impact avec la turbulence et les sources acoustiques de bord de fuite des pales comme les lâchers tourbillonnaires sont aléatoires et sont donc indépendantes entre plusieurs pales. Le bruit rayonné par un propulseur constitué de plusieurs pales est donc la résultante des champs acoustiques rayonnés par les pales indépendantes en rotation. Pour les modèles plus avancés de propulseur, une fonction de corrélation peut être prise en compte pour les sources acoustiques de bord d'attaque puisqu'un même tourbillon peut impacter plusieurs pales [Rozenberg 2007]. Les principales sources acoustiques associées sont de deux types : des effets du fluide sur les pales au niveau des bords d'attaque et des bords de fuite des pales et la brisure des bulles de cavitation du propulseur dans le sillage du propulseur.

Bruit hydrodynamique

Le bruit hydrodynamique du propulseur provient de l'influence du fluide sur le propulseur induite par le mouvement de celui-ci dans l'eau. Les sources acoustiques associées à ce bruit sont de deux natures fréquentielles : large bande et tonale (fréquence pure). Le terme *bosse de bruit* désignera par la suite une source dont l'autospectre moyen est caractérisé par deux pentes monotones et une fréquence f_{max} pour laquelle cet autospectre est maximum. La figure 1.5 représente schématiquement l'autospectre d'une telle source. La valeur en decibels d'une amplitude linéaire A est $A_{dB} = 10 \log_{10} A$.

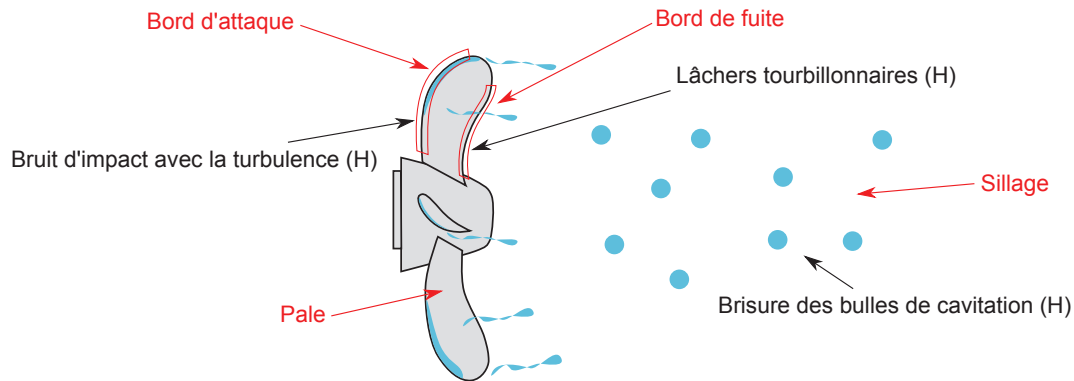


FIGURE 1.4 – Éléments du propulseur représentés en rouge et sources acoustiques associées indiquées en noir.

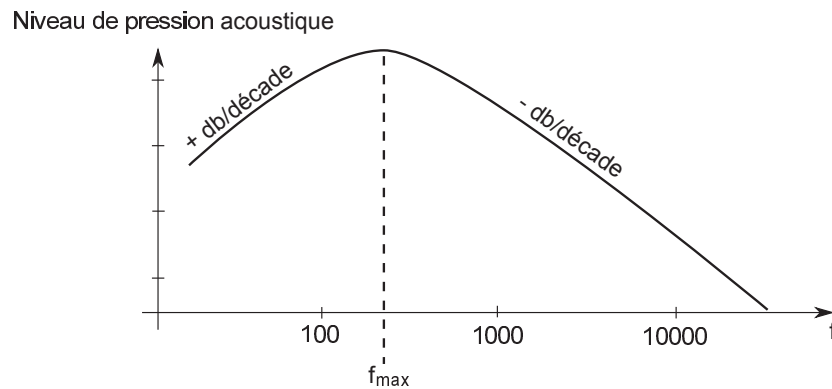


FIGURE 1.5 – Autospectre moyen d'une source de type "bosse de bruit".

Les sources de type "bosse de bruit" de bord d'attaque et de bord de fuite sont réparties respectivement le long des bords d'attaque et des bords de fuite de pales (encadrées en rouge sur la figure 1.4) et ont une directivité complexe dépendant de la fréquence [Paterson 1976, Blake 1984, Roger 2010]. Elles correspondent à des excitations aléatoires telles que l'impact avec la turbulence de l'écoulement amont ou des lâchers tourbillonnaires au niveau des bords de fuite (fig. 1.4). En effet, le bord d'attaque d'une pale est soumis au sillage turbulent de la coque, des rafales de tourbillons impactent donc la pale générant ainsi des fluctuations de la force de portance (fig. 1.2), *i.e.* la force hydrodynamique exercée dans la direction orthogonale à la pale due à l'écoulement. Ces fluctuations de force rayonnent des ondes acoustiques de façon directive et l'autospectre moyen de ces ondes acoustiques est une bosse de bruit.

Le bruit tonal est induit par des phénomènes périodiques tels que la rotation des pales du propulseur ou des phénomènes de couplage comme le chant d'hélice. Le chant d'hélice est une source associée à l'interaction entre le fluide et les pales de propulseur. Il résulte d'un couplage hydroacoustique entre le champ acoustique rayonné par le bord de fuite des pales et la vibration du bord de fuite. La source hydroacoustique de chant d'hélice est dipolaire et

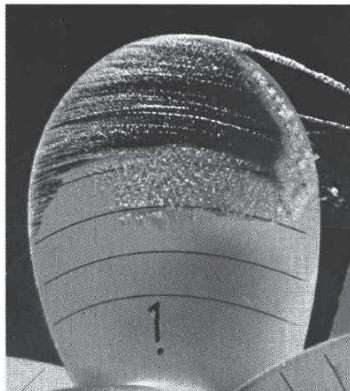
localisée sur le long du bord de fuite des pales. Généralement, les pales de propulseur sont traitées afin d'éviter ce phénomène de couplage (affûtage du bord de fuite) [Bearman 1965, Ikeda 2012]. Le seul bruit tonal de propulseur est donc celui lié à la vitesse de rotation des pales, il possède un fort niveau et possède une longue portée du fait de sa basse fréquence. Du fait de ces propriétés de propagation, la fréquence associée à la rotation du propulseur est utilisée à des fins de détection, par exemple par l'outil DEMON [d'Assumpcao 1970] ou en exploitant la cyclostationnarité de ce signal [Antoni 2012b], ou fait l'objet de surveillance comme le préconise la DCSMM.

Bruit de cavitation

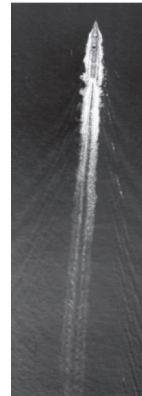
Le brisure des bulles de cavitation d'un propulseur est une excitation hydrodynamique rayonnant un champ de pression acoustique en champ lointain. La cavitation correspond au phénomène de création de bulles de gaz dans un fluide dans une zone où la pression du fluide diminue et devient inférieure à la pression de vapeur saturante, à température constante. La brisure de ces bulles produit un rayonnement acoustique monopolaire et intervient dans le sillage du propulseur. Pour un navire de surface, ce phénomène intervient à la surface des pales dans les zones de décollement de la couche limite turbulente (cavitation par poches illustrée par la figure 1.6a) [Kuiper 1981, Brennen 1995]). Pour les navires de surface, la cavitation du propulseur est importante et contribue à la signature acoustique du navire. La figure 1.6b présente une illustration du sillage que produit le propulseur d'une frégate Montcalm lors de la campagne d'essais CELADON [Caillé 2007], le transport des bulles de cavitation est visible par la traînée blanche dans le sillage du navire. Les sources associées à la brisure des bulles de cavitation sont des sources "bosse de bruit", dont le spectre est schématisé sur la figure 1.5 avec une fréquence maximale déterminée par la taille des bulles de cavitation. Plus les bulles sont grosses, plus les fréquences des émissions acoustiques sont basses. Un modèle acoustique de bulles sphériques, ponctuelles et indépendantes peut être choisi en première approximation en utilisant l'équation de Rayleigh-Plesset et en utilisant une directivité monopolaire [Plesset 1977].

1.2.3.2 Sources vibroacoustiques associées aux sources internes

Terme habituellement utilisé dans le domaine naval, les sources internes d'un navire de surface désignent toutes les sources acoustiques associées aux excitations mécaniques de la carène localisées à l'intérieur du navire. Physiquement, ces excitations mécaniques sont les machines internes équipant un navire telles que le moteur, l'arbre du propulseur, les machines auxiliaires (fig. 1.7). Les machines internes vibrent et rayonnent un champ de pression acoustique à l'intérieur de la carène qui est la partie immergée de la coque du navire. Ces vibrations et ces ondes acoustiques excitent la carène qui se met à vibrer, ces vibrations rayonnent un champ de pression acoustique à l'extérieur de la carène sous certaines conditions (fréquence critique, angle d'incidence des ondes acoustiques d'excitation, etc) [Lesueur 1988]. Les vibrations de la carène sont généralement atténuées ou sont amplifiées selon leur coïncidence avec les fréquences propres de résonance de la structure. Ces ma-



(a) Cavitation d'une pale de propulseur



(b) Sillage de frégate

FIGURE 1.6 – Cavitation d'une pale de propulseur à bord d'attaque rugueux (a), figure extraite de la thèse de Kuiper [Kuiper 1981]. Campagne CELADON : Photo aérienne du sillage de la frégate Montcalm (b), figure extraite de la thèse de Caillé [Caillé 2007].

chines internes sont essentiellement composées de pièces tournantes, il y a donc un certain nombre de composantes tonales qui dominent le spectre acoustique associées aux sources internes. Ces fréquences tonales rendent compte de la périodicité des machines internes mais également des modes de résonances de la coque du navire pouvant amplifier certaines fréquences [Lesueur 1988, Skelton 1997].

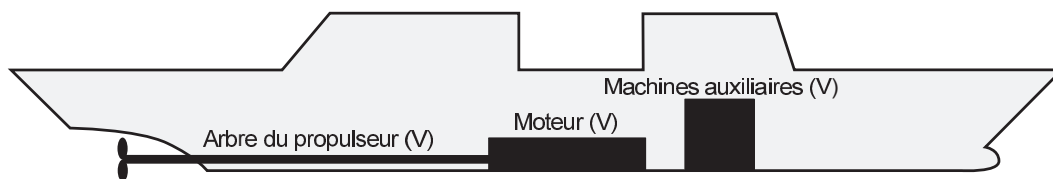


FIGURE 1.7 – Sources internes excitant la carène.

1.2.3.3 Sources associées au mouvement du navire

Le bruit d'origine hydrodynamique de la carène est induit par divers phénomènes physiques tels que la brisure de la vague d'étrave, l'éclatement des bulles dans le sillage du bâtiment, les divers tourbillons générés par les appendices et les résonances de cavités sur la carène. Ces différents éléments du navire sont schématisés sur la figure 1.8.

La figure 1.9 est une photographie de la frégate Lafayette en navigation, elle permet de visualiser les sillages cavitants et la vague d'étrave d'un navire de surface. Les sources prédominantes associées au mouvement du navire sont la brisure de la vague d'étrave et la brisure des bulles transportées par le sillage du navire de surface. Ce sont des sources de type "bosse de bruit" dont le spectre est schématisé sur la figure 1.5 et possède des caractéristiques similaires aux sources associées à la brisure des bulles de cavitation [Brennen 1995].

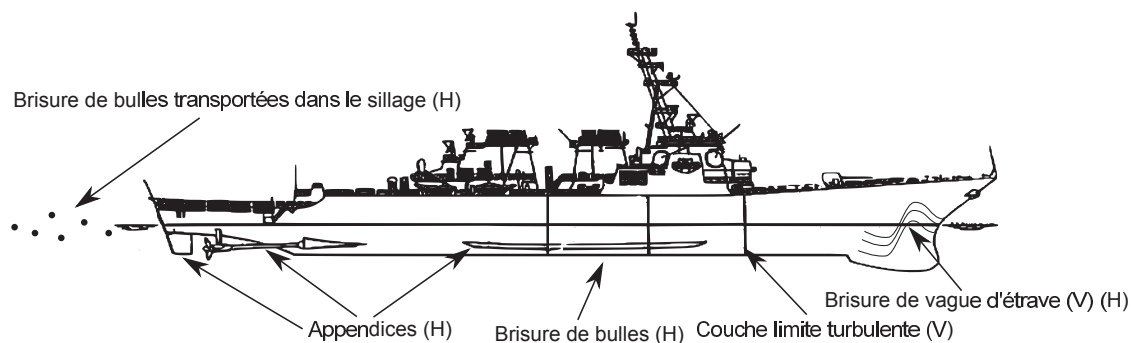


FIGURE 1.8 – Excitations hydrodynamiques associées au mouvement de la carène [Jong 2009].



FIGURE 1.9 – Frégate Lafayette, aperçu des sillages cavitants autour de la frégate. Photo © Marine Nationale.

Le rayonnement acoustique de la brisure de la vague d'étrave est actuellement étudié en considérant des vagues déferlantes produites par le vent à la surface de la mer. En effet, la vague d'étrave pouvant rayonner directement ou produire un rayonnement acoustique en excitant hydrodynamiquement les vibrations de la coque, les recherches se sont consacrées dans un premier temps à l'étude d'une vague seule. Ainsi, Loewe *et al.* ont proposé un modèle de spectre de bruit de vague basé sur le spectre rayonné par un ensemble de bulles qui se brisent [Loewen 1991]. De même, Deane a proposé un modèle de spectre de bruit de vague déferlante qu'il a validé par la mesure [Deane 2010]. Ainsi, il modélise une source de vague déferlante par une "bosse de bruit" dont la fréquence maximale avoisine 1000Hz [Deane 1997]. Des études hydrodynamiques sur l'apparition, la brisure et la forme de la vague d'étrave en fonction de la géométrie de la proue d'un navire de surface ont été réalisées [Noblesse 2011] et peuvent être utilisées pour alimenter le modèle de Deane.

Le bruit du sillage d'un navire de surface est dû à la brisure des bulles dans le sillage. Ces bulles sont produites par la brisure des vagues d'étrave et de poupe et elles sont trans-

portées dans le sillage du navire localisé autour du navire et sous le navire comme le montre la photo de la figure 1.6b. La géométrie du sillage et la statistique sur la taille des bulles existant dans le sillage ont été étudiées dans la thèse de Caillé [Caillé 2007], principalement pour évaluer les pertes de transmission des communications acoustiques sous-marines au travers du sillage d'un navire de surface [Lamarre 1994, Stanic 2007]. Le rayonnement acoustique d'un sillage de navire ou de brisure de vague d'étrave est difficile à modéliser du fait de la complexité des phénomènes physiques en jeu, peu de mesures passives de ce bruit ont été publiées dans la littérature. Une première étude expérimentale de ce bruit a été réalisée par De Jong *et al.* sur une maquette tractée de navire de surface dans le bassin d'essais des carènes de l'entreprise MARIN [Jong 2009]. Les résultats de ces mesures ont fourni de premières estimées de la localisation des sources hydroacoustiques à la brisure de la vague d'étrave et au niveau du sillage du navire, ces résultats sont sommés sur une large bande [1kHz; 12kHz]. Le rayonnement acoustique d'une vague déferlante produite par le vent sur la surface de la mer a été mesuré par une antenne linéaire de 15 hydrophones immergée à 3 mètres sous la vague [Andrew 2001] dans la bande fréquentielle [400Hz; 2000Hz], typique du bruit de vague, et confirme l'hypothèse d'une source de type "bosse de bruit".

1.2.3.4 Composition de la signature acoustique sous-marine d'un navire en mouvement

La revue bibliographique précédente a permis de recenser un grand nombre de sources composant la signature acoustique sous-marine d'un navire de surface, cette liste de sources a été organisée en trois classes : les sources de propulseur, les sources internes de carène et les sources de mouvement du navire. Le tableau 1.1 récapitule la composition de la signature acoustique d'un navire de surface en mouvement. Cette liste précise la localisation des sources acoustiques sur la surface extérieure de la carène du navire et le contenu spectral de celles-ci .

1.2.4 Contributions énergétiques des différentes sources acoustiques

Une synthèse de plusieurs mesures de signature acoustique de navire de surface publiées dans la littérature est maintenant réalisée afin d'identifier les sources acoustiques prédominantes parmi celles recensées dans la sous-section précédente. Cette connaissance de la contribution énergétique des différentes sources va permettre d'orienter le choix des sources simulées pour construire le simulateur simplifié de rayonnement acoustique de navire de surface en mouvement.

Les mesures de signature acoustique de navire publiées dans la littérature concernent essentiellement des navires de recherche et des navires commerciaux étudiées par la communauté scientifique. Les bâtiments militaires font l'objet d'une exigence de discrétion acoustique et sont donc soumis à une mesure de signature acoustique régulière, cependant leur confidentialité ne permet pas de constituer une base de données de signatures acoustiques exploitable.

Chapitre 1. Modélisation simplifiée du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface en mouvement

Type de sources	Localisation	Type d'excitation à l'origine du rayonnement acoustique	Contenu spectral	Bande fréquentielle
Sources de propulseur	Bords d'attaque des pales	Impact avec la turbulence	bosse de bruit	[10 Hz ; 1 kHz]
	Bords d'attaque des pales	Impact périodique avec la turbulence	tonal	< 50 Hz
	Bords de fuite des pales	Lâchers tourbillonnaires	bosse de bruit	[1 kHz ; 10 kHz]
	Bords de fuite des pales	Chant d'hélice	tonal	[1 kHz ; 2 kHz]
	Sillage du propulseur	Cavitation	bosse de bruit	[10 Hz ; 10 kHz]
Sources internes	Surface de carène	Vibrations induites par les machines internes, arbre du propulseur	tonal	[10 Hz ; 300 Hz]
Sources de mouvement	Autour de la carène	Cavitation	bosse de bruit	[10 Hz ; 10 kHz]
	Cavités, appendices	Résonance, interaction avec turbulence	large bande	[10 Hz ; 2 kHz]
	Sillage du bâtiment	Cavitation	bosse de bruit	[10 Hz ; 10 kHz]
	Etrave	Vibrations induites par la vague d'étrave	large bande	[10 Hz ; 10 kHz]
	Vague d'étrave	Bruit de brisure de la vague d'étrave	bosse de bruit	[10 Hz ; 2 kHz]

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif de la composition de la signature acoustique d'un navire de surface en mouvement.

Dans cette sous-section, la contribution énergétique de différents types de sources est d'abord étudiée au vu des données expérimentales de la littérature publique. Ensuite, la contribution énergétique des différentes sources acoustiques au sein de chaque classe définie sur la sous-section 1.2.2 est présentée brièvement.

Contributions énergétiques de différents types de sources acoustiques : sources de propulseur non cavitant, sources de cavitation, sources internes de carène

Plusieurs auteurs ont étudié la composition de la signature acoustique d'un navire de surface au moyen de modèles paramétriques. Ces modèles sont constitués de quelques gabarits spectraux moyens correspondant à chaque type de sources pris en compte. Par exemple, les types de sources considérés par Audoly *et al.* dans le modèle paramétrique du projet AQUO [Audoly 2014] sont les sources internes de carène, les sources de propulseur sans cavitation et les sources de cavitation. Ces gabarits spectraux sont généralement présentés par bande de tiers d'octave, les niveaux de ces gabarits correspondent alors à la somme des niveaux du spectre en bande fine sur chaque bande de tiers d'octave.

L'objectif des approches de modèles paramétriques est d'identifier les paramètres de ces gabarits spectraux en minimisant l'écart de ces modèles à des mesures de signature acoustique de navire de surface. De nombreux modèles paramétriques sont disponibles dans la littérature et leurs domaines de validité sont résumés dans le tableau 1.2 issu de l'article de Audoly [Audoly 2014]. Ces modèles sont désignés dans le tableau 1.2 par les termes suivants : Urick [Urick 1983], Ross [Ross 1976], Wales [Wales 2002], ANATRA [Espérandieu 1990], RANDI [Wagstaff 1973] et son extension [Breeding 1996], Audoly [Audoly 2014].

Une signature acoustique assez représentative des navires marchands est la signature acoustique du navire cargo "MV Overseas" [Arveson 2000], il a une longueur de 173 mètres

Modèle	Urlick	Ross	Wales	ANATRA	RANDI	RANDI 3.1	Audoly
Dépendance en vitesse	X	X			Liée à la catégorie		X
Dépendance en taille	X	X			Liée à la catégorie		X
Dépendance en catégorie					X	X	X
Bande de fréquences	[100Hz ; 10kHz]	[10Hz ; 1kHz]		[10Hz ; 10kHz]	[10Hz ; 1kHz]	[10Hz ; 10kHz]	

TABLE 1.2 – Domaines de validité des différents modèles paramétriques de gabarits de spectres de bruit rayonné par les navires, résumés par Audoly [Audoly 2014].

et possède un moteur diesel comme la plupart des navires marchands. Les contributions énergétiques des trois types de sources sont estimées par le modèle de Audoly [Audoly 2014] pour le “MV Overseas” et sont représentées sur la figure 1.10a pour une vitesse de 8 nœuds et sur la figure 1.10b pour une vitesse de 16 nœuds. Dans la légende de ces figures, la signature acoustique en tiers d’octave du “MV Overseas” est notée *Measurement*, la contribution du bruit associé aux machines internes de carène est notée *Nmach*, la contribution du bruit de propulseur sans cavitation est notée *Nprop*, la contribution du bruit de cavitation est notée *Ncav* et la somme des contributions estimées est notée *Pattern*.

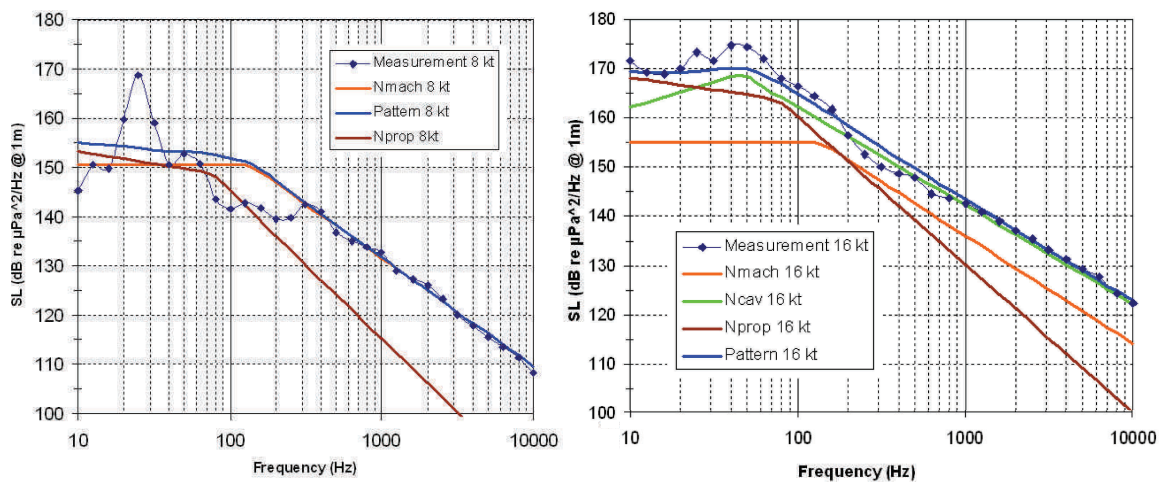


FIGURE 1.10 – Signatures acoustiques du cargo “MV Overseas” à une vitesse de 8 nœuds (a) et 16 nœuds (b). Estimation des contributions énergétiques de trois classes de sources par le modèle paramétrique de Audoly. Cette figure est extraite de l’article de Audoly [Audoly 2014].

Le gabarit spectral moyen du bruit associé aux machines internes de carène est modélisé comme un spectre large bande. Sur la figure 1.10a, on constate que la fréquence 25 Hz émergeant fortement à la vitesse de 8 nœuds n’est pas reconstruite par le modèle paramétrique de Audoly. De plus, à cette vitesse, le bruit des machines internes domine le bruit du propulseur sur la bande [50Hz; 10kHz] de 10 dB à 20 dB et aucune énergie n’est affectée à la cavitation.

À la vitesse de 16 nœuds, une grande zone d'éclatement de bulles existe autour du navire et dans son sillage, ce bruit est identifié par le modèle de cavitation de Audoly et domine les autres classes de sources d'au moins 10 dB sur toute la bande fréquentielle. À cette vitesse, la contribution du bruit de propulseur a augmenté et domine le bruit des machines internes jusqu'à la fréquence 150 Hz, cette augmentation d'énergie en basses fréquences provient de l'augmentation des niveaux des harmoniques de la fréquence de passage de pales (fig. 1.10b).

Dans notre étude, les vitesses de navire considérées seront inférieures à 10 nœuds. D'après l'analyse précédente, pour ces vitesses, le bruit de cavitation n'est pas prédominant. Le bruit hydrodynamique de propulseur et le bruit des machines internes seront donc les principales sources à étudier et à modéliser.

Contributions énergétiques des sources de propulseur

Dans son rapport technique [Blake 1984], Blake propose des gabarits spectraux pour représenter la contribution énergétique des différentes sources de propulseur dans la bande [10Hz; 10kHz]. Les gabarits spectraux des sources contribuant au bruit d'une pale, profil hydrodynamique cavitant, sont présentés sur la figure 1.11a. Un ordre de grandeur en dB est donné et les spectres de chaque source sont schématisés de telle sorte à mettre en évidence la hiérarchie énergétique des sources lorsque la cavitation est complètement établie. L'allure globale du spectre de pale est confirmée par les mesures acoustiques d'un profil hydrodynamique positionné dans un tunnel hydrodynamique par Barker [Barker 1976]. Dans ce cas, la cavitation domine le spectre rayonné par la pale et présente un maximum à une fréquence dans l'intervalle [50Hz; 200Hz] (fig. 1.11a). Au niveau d'une pale de propulseur (fig. 1.11a), le bruit d'impact du bord d'attaque avec la turbulence domine les basses fréquences jusqu'à environ 1000 Hz alors que les lâchers tourbillonnaires aux bords de fuite dominent plutôt les hautes fréquences. La source tonale de chant d'hélice très énergétique et de fréquence avoisinant 1000 Hz est une source dominante mais généralement éliminée par un affûtage du bord de fuite des pales.

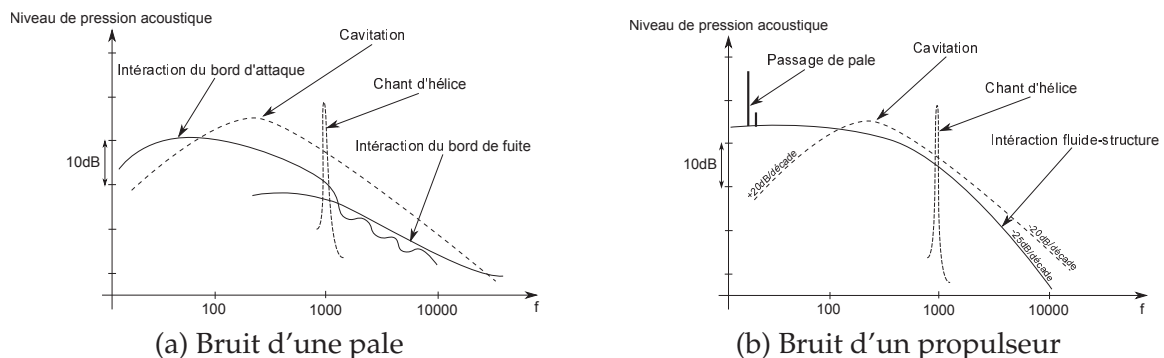


FIGURE 1.11 – (a) Gabarits spectraux des contributions du bruit rayonné par un profil hydrodynamique cavitant [Blake 1984]. (b) Gabarits spectraux du bruit rayonné par un propulseur [Ross 1976, Audoly 2014]

Le bruit rayonné par un propulseur de navire en fonctionnement est la résultante du bruit rayonné par les différentes pales en mouvement de rotation. La figure 1.11b schématise la contribution de chaque source acoustique dans le bruit rayonné par un propulseur complet d'après Blake [Blake 1984] et le modèle paramétrique de Audoly [Audoly 2014]. Au vu de la figure 1.11, lorsque la cavitation est établie, elle domine toutes les autres sources acoustiques de pale et de propulseur sur $[100\text{Hz}; 10\text{kHz}]$. La figure 1.11b montre que la fréquence de passage de pales, souvent inférieure à 100 Hz, est la source prédominante de propulseur qui fait l'objet d'intérêt dans le cadre de la DCSMM du fait de sa longue portée et de son énergie.

Dans notre étude, la cavitation ne sera pas modélisée comme évoqué précédemment et le chant d'hélice non plus car les bords de fuite des pales sont généralement traités pour le supprimer. La fréquence de rotation des pales est très basse et ne sera pas modélisée dans cette thèse car elle est très inférieure à la fréquence minimale de la bande passante de l'antenne d'hydrophones utilisée. Nous choisissons ici de modéliser uniquement le bruit d'impact du bord d'attaque des pales avec la turbulence du fait de sa simplicité de modélisation.

Contributions énergétiques des sources vibroacoustiques associées aux sources internes

Arveson et Vendittis ont réalisé une mesure de la signature acoustique du navire cargo "MV Overseas" à la vitesse de 8 nœuds qui est représentée en spectre de bande fine sur la bande $[0\text{Hz}; 200\text{Hz}]$ avec une résolution fréquentielle de 0,5 Hz [Arveson 2000] sur la figure 1.12, les niveaux du spectre bande fine correspondent donc à des niveaux d'énergie pour des bandes fréquentielles de largeur 0,5 Hz. Sur cette figure, on constate que des raies fréquentielles fortement énergétiques émergent de 10 dB à 25 dB de la composante large bande et dont les amplitudes dépendent de l'atténuation vibroacoustique de la carène du navire. Ces raies fréquentielles correspondent aux harmoniques des fréquences du moteur diesel et des machines auxiliaires. Dans une mesure de signature acoustique de navire de surface réel, il n'est pas possible d'isoler expérimentalement chaque source acoustique, la signature acoustique représentée sur la figure 1.12 contient donc quelques harmoniques des fréquences de passage de pales.

Contributions énergétiques des sources associées au mouvement d'un navire de surface

De Jong *et al.* ont mesuré la signature acoustique d'une maquette de frégate d'environ 11 mètres de long dans le bassin d'essais des carènes de la société néerlandaise MARIN [Jong 2009] à l'aide d'une antenne linéaire. La figure 1.13a représente une estimée de la localisation des sources acoustiques à la vitesse $1,6\text{m.s}^{-1}$ avec un résultat intégré sur $[1\text{kHz}; 12\text{kHz}]$, on distingue une source localisée au niveau de la poupe autour de l'abscisse 0 et une source localisée au niveau de l'étrave au niveau de l'abscisse 18. La figure 1.13b représente la localisation des sources à la vitesse 3m.s^{-1} , trois sources sont localisées aux abscisses -2, 12 et 19 avec des amplitudes égales à 2 dB près.

D'après la figure 1.13, la source acoustique localisée au niveau de la poupe est la plus énergétique et correspond sans doute à la vague de poupe. La seconde principale source

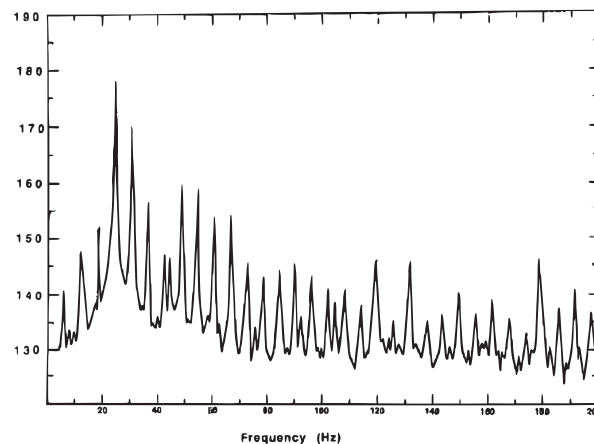


FIGURE 1.12 – Signature acoustique du cargo “MV Overseas” à une vitesse de 8 nœuds. Représentation en bande fine avec une résolution fréquentielle de 0,5 Hz, l’amplitude est exprimée en decibels acoustiques. Cette figure est extraite de l’article de Arveson et Vendittis [Arveson 2000].

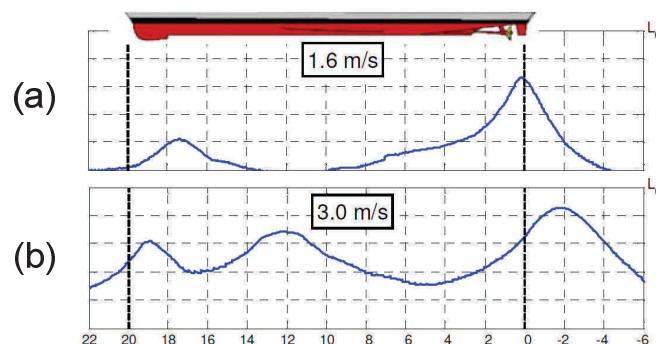


FIGURE 1.13 – Estimation de la localisation des sources associées au mouvement de la maquette d’une frégate à la vitesse $1,6\text{ m.s}^{-1}$ (a) et 3 m.s^{-1} (b). La localisation des sources est en unité arbitraire en abscisse et l’amplitude correspond à l’énergie intégrée sur la bande $[1\text{ kHz}; 12\text{ kHz}]$ avec l’échelle 2dB/division. Cette figure est extraite de l’article de De Jong *et al.* [Jong 2009]

acoustique associée au mouvement d’un navire de surface est le bruit de la brisure de la vague d’étrave qui intervient à différentes localisations le long du navire selon que la première vague ou la deuxième vague d’étrave se brise en fonction de la vitesse.

Ces résultats qui sont représentés de façon large bande fournissent une première indication des zones du navire les plus émissives mais des études plus approfondies restent à être menées pour analyser ces sources en bande fine et avec une meilleure résolution. De plus, le bassin d’essais utilisé est un environnement confiné, il est possible que le confinement perturbe les performances de localisation de sources. Les expérimentations qui ont eu lieu

au lac de Castillon et qui seront présentées dans le chapitre 3 possèdent des conditions de mesure favorables pour mener une telle étude. Dans leur article, De Jong *et al.* affirment que la modélisation numérique ou analytique de sources associées au mouvement d'un navire de surface est compliquée et un problème encore non résolu. Dans ce chapitre, ces sources ne seront donc pas modélisées.

1.3 Modélisation simplifiée des sources acoustiques d'un navire de surface

Cette section présente plusieurs modélisations de sources acoustiques sous-marines de navire de surface dans l'objectif de construire un simulateur réaliste de bruit rayonné par un navire de surface avec une diversité spatiale. En effet, dans le chapitre 2, des méthodes de traitement d'antenne pour estimer la localisation des sources et la contribution énergétique de chaque source dans la signature acoustique d'un navire de surface seront présentées et appliquées à des données générées par ce simulateur.

De nos jours, les modélisations des sources acoustiques d'un navire de surface sont réalisées essentiellement au moyen d'outils numériques et de façon locale étant donnée la complexité calculatoire. Le bruit rayonné par un navire dans son entier n'est donc pas modélisable de manière précise aujourd'hui et les études numériques actuelles sont réalisées sur des parties du navire considérées indépendamment telles que le propulseur [Gutin 1948, Salvatore 2009], les coques de sous-marins [Caresta 2009, Aucejo 2010], les bulles de cavitation [Brennen 1995]. Une alternative aux calculs numériques qui sont souvent coûteux en temps est la modélisation analytique qui n'utilise pas de maillage de discrétisation de l'espace de calcul et des hypothèses simplificatrices. Les modèles analytiques existants permettent de prédire le bruit rayonné par des éléments du navire tels que le propulseur [Roger 2010] ou des structures vibrantes simples [Lesueur 1988, Laulagnet 1998]. Certaines sources telles que celle associée à la brisure de la vague d'étrave ou celle associée au sillage du navire ne sont pas modélisable du fait de la complexité des phénomènes physiques. D'après les données expérimentales de signature acoustique de différents navires de surface [Wales 2002, McKenna 2012, Audoly 2014], il apparaît que chaque navire possède sa propre signature acoustique. La synthèse bibliographique de la section précédente a permis d'identifier la contribution relative de chaque classe de sources acoustiques mais également les sources acoustiques prédominantes de chaque classe, selon la vitesse du navire.

Pour construire un simulateur réaliste de bruit rayonné par les navires de surface, il n'est pas nécessaire de développer un outil de simulation fine au vu de la forte variabilité de la signature acoustique d'un navire à l'autre, seules quelques sources principales sont donc choisies pour ce simulateur. Il est important d'avoir des sources de type vibroacoustique et de type hydroacoustique puisque ce sont les deux types de sources d'un navire de surface qui peuvent dominer et il est important d'avoir une diversité spatiale des sources dans ce simulateur pour l'évaluation des performances des méthodes de localisation de sources. La modélisation analytique est privilégiée par rapport aux outils de modélisation numérique

pour plusieurs raisons. Cette approche a recours à des hypothèses simplificatrices et possède de ce fait des temps de calcul bien inférieurs à ceux de la simulation numérique. Ces modélisations bien qu'approchées permettent de fournir une représentation moyenne des sources réelles.

Les sources qui ont été sélectionnées à partir de l'étude précédente pour composer le simulateur de bruit rayonné par un navire de surface sont :

1. une source de bruit d'impact de bord d'attaque de pale avec la turbulence pour modéliser une source hydroacoustique de propulseur de type "bosse de bruit"
2. une plaque vibrante pour modéliser les sources vibroacoustiques associées aux sources internes de carène avec un spectre de raies

Le bruit de bord d'attaque de pale a été choisi car il est prédominant pour des fréquences inférieures à 1 kHz (fig. 1.11). En effet, les fréquences basses d'un navire de surface sont importantes à surveiller car elles sont très énergétiques et ont une longue portée de propagation, en particulier la DCSMM préconise la surveillance des niveaux de pression acoustique rayonnée dans les tiers d'octave 63 Hz et 125 Hz. De plus, le modèle de plaque vibrante a été choisie car sa modélisation est simple et sa géométrie est proche de celle d'une coque de navire de surface.

Comme il l'a été évoqué dans la sous-section 1.2.4, les sources acoustiques de brisure des bulles de cavitation n'ont pas été choisies car la cavitation est prédominante pour des vitesses supérieures à celles choisies dans notre étude (fig. 1.10). Les sources associées au mouvement du navire ne sont pas modélisées car aucune modélisation représentative du rayonnement acoustique réel n'est actuellement disponible.

Dans cette section, la méthode de modélisation d'une source acoustique quelconque est brièvement rappelée. Ensuite, la modélisation analytique d'une source de bruit d'impact du bord d'attaque avec la turbulence d'une pale est présentée. Enfin, la modélisation analytique du champ vibratoire d'une plaque vibrante est présentée.

1.3.1 Modélisation d'une source acoustique quelconque

1.3.1.1 Source acoustique de volume quelconque

On considère une source acoustique de volume quelconque fini et entouré par une surface Σ . Le champ extérieur de pression acoustique rayonné par cette source et mesuré au point A_m , se calcule dans le domaine fréquentiel par l'intégrale suivante, issue de l'équation de Helmholtz [Morse 1968] :

$$p(A_m, f) = \iint_{\Sigma} G(A_m|S, f) \frac{\partial p(S, f)}{\partial \vec{n}(S)} - p(S, f) \frac{\partial G(A_m|S, f)}{\partial \vec{n}(S)} dS \quad (1.1)$$

avec $p(S, f)$, $S \in \Sigma$ la pression acoustique en un point S , $G(A_m|S, f)$ la fonction de Green champ libre liant un point S à un point A_m et $\vec{n}(S)$ la normale orientée vers l'extérieur de la

surface Σ . Les paramètres géométriques de cette équation sont représentés sur la figure 1.14. Ce problème de rayonnement se résout numériquement en discrétisant la surface Σ avec des éléments de frontière [Bonnet 1995]. L'utilisation de ces outils est cependant limitée par leur important temps de calcul.

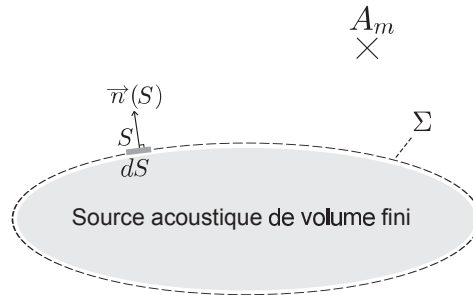


FIGURE 1.14 – Géométrie du problème de rayonnement acoustique extérieur.

Pour des objets simples comme un piston, une plaque, un cylindre ou une sphère pulsante, la modélisation analytique du rayonnement acoustique de ces sources fournit l'expression exacte du champ acoustique en tout point de l'espace [Lesueur 1988].

1.3.1.2 Source acoustique ponctuelle

Dans de nombreux cas, la caractérisation d'une source acoustique de volume fini se fait de façon équivalente en utilisant un modèle de sources acoustiques ponctuelles. Sous des hypothèses simplificatrices, une source acoustique de volume fini peut être ramenée à un modèle équivalent composé d'un nombre fini de sources acoustiques ponctuelles rayonnant le même champ acoustique avec les mêmes conditions aux limites [Koopmann 1989, Jeans 1992, Kropp 1995, Pereira 2013]. Pour un problème extérieur de rayonnement acoustique, les sources équivalentes sont généralement positionnées à l'intérieur du volume de la source réelle, comme illustré sur la figure 1.15.

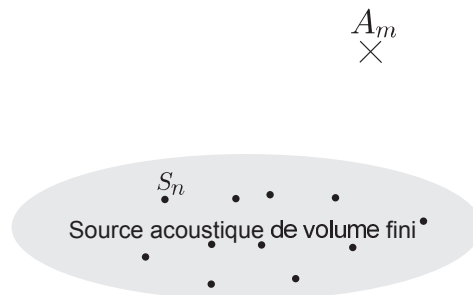


FIGURE 1.15 – Formulation du problème de rayonnement acoustique extérieur par méthode de sources équivalentes.

Les modèles analytiques vibroacoustiques ou hydroacoustiques reposent sur des hypothèses simplificatrices décrivant le bruit rayonné par un objet comme le champ de pression acoustique rayonné par une distribution équivalente de N sources ponctuelles localisées aux points $S_n, n \in [1, N]$ rayonnant le même champ de pression que l'objet physique d'étude. Ces sources équivalentes, appelées "multipôles" dans la littérature [Morse 1968, Williams 1999], sont caractérisées par une directivité et leur cohérence permet de modéliser le champ de pression acoustique rayonné par un objet complexe. Ces sources élémentaires sont utilisées dans les modèles mathématiques de sources présentés dans les paragraphes 1.3.2 et 1.3.3.

Deux types de sources ponctuelles équivalentes sont utilisés dans les modèles analytiques de sources acoustiques de cette sous-section : le monopôle pour les sources vibroacoustiques associées aux sources internes et le dipôle pour les sources hydroacoustiques de profil. Ces deux sources sont définies mathématiquement par la pression acoustique $p(S_n, t)$ qu'elles rayonnent à une distance d'un mètre.

Monopôle acoustique

Le monopôle est une source omnidirectionnelle et représente une source de volume fluctuant. Soit q le débit acoustique en $m^3.s^{-1}$ d'une source située en S_n et ρ la densité du fluide environnant, l'expression mathématique de la pression acoustique rayonnée à un mètre d'une source monopolaire est donnée par :

$$p(S_n, t) = -\rho \frac{\partial q(S_n, t)}{\partial t} \quad (1.2)$$

Dipôle acoustique

Le dipôle est une source directive et représente une source de force fluctuante. Cette source est constituée de deux sources monopolaires en opposition de phase et espacées de moins d'une longueur d'onde acoustique. Les paramètres géométriques d'une source dipolaire sont représentés sur la figure 1.16.

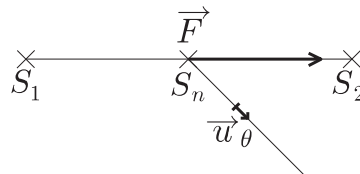


FIGURE 1.16 – Géométrie d'un dipôle ponctuel

Soit q le débit acoustique en $m^3.s^{-1}$ de chacune des deux sources monopolaires situées respectivement en S_1 et S_2 , la force \vec{F} associée à ce dipôle est appliquée au point S_n situé au milieu de $[S_1 S_2]$ et son vecteur est exprimée de la façon suivante :

$$\vec{F}(S_n, t) = \overrightarrow{S_1 S_2} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} \quad (1.3)$$

Les fluctuations spatiales de la force $\vec{F}(S_n, t)$ induisent un champ de pression acoustique. L'expression mathématique de la pression acoustique rayonnée à un mètre d'une source dipolaire en S_n observée à un mètre dans la direction du vecteur unitaire \vec{u}_θ est donnée par :

$$p(S_n, \theta, t) = \text{div} \left[\vec{F}(S_n, t) \right] = \frac{1}{c} \vec{u}_\theta \cdot \frac{\partial \vec{F}(S_n, t)}{\partial t} \quad (1.4)$$

avec $\text{div} [\cdot] = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ l'opérateur de divergence et c la célérité des ondes acoustiques dans le milieu de propagation.

1.3.2 Modélisation simplifiée d'une source hydroacoustique de propulseur

Cette sous-section concerne la modélisation simplifiée d'une source de bruit d'impact de bord d'attaque de pale avec la turbulence pour simuler le bruit rayonné par un propulseur de navire de surface, dont le choix a été motivé en introduction de la présente section. Comme cela a été présenté dans le paragraphe 1.2.3.1, deux principales sources hydroacoustiques localisées au niveau du bord d'attaque des pales existent [Paterson 1976] :

1. une source large bande induite par les fluctuations aléatoires de portance générées par l'impact avec la turbulence
2. une source périodique induite par l'impact périodique du bord d'attaque avec la turbulence contenant des harmoniques aux fréquences multiples de la fréquence de passage des pales

Dans cette sous-section, le modèle analytique de bruit de bord d'attaque proposé par Sears [Sears 1938] est d'abord détaillé puis la simulation du bruit de bord d'attaque par ce modèle est comparée à des données expérimentales de la littérature pour évaluer la validité des hypothèses simplificatrices utilisées.

1.3.2.1 Source de bruit d'impact d'un bord d'attaque de pale avec la turbulence

Le bruit d'impact avec la turbulence du bord d'attaque d'une pale est modélisé en plusieurs étapes :

1. Décrire l'écoulement turbulent amont de la pale pour exprimer les fluctuations de vitesses particulières de l'écoulement,
2. Exprimer les fluctuations de force de portance appliquées à la pale qui sont induites par les fluctuations de vitesses particulières de l'écoulement

Dans ce qui suit, ces deux étapes sont décrites et correspondent aux quantités à déterminer pour exprimer les signaux sources de bruit de bord d'attaque de pale. Cette source hydroacoustique est considérée ponctuelle et de directivité dipolaire.

Les hypothèses simplificatrices utilisées ici décrivent la pale comme une plaque mince, *i.e.* d'épaisseur h infinitésimale, de corde de dimension finie C , d'envergure de dimension infinie et compacte. Les paramètres géométriques et les notations utiles au modèle analytique décrit dans ce qui suit sont représentés sur le schéma de la figure 1.17.

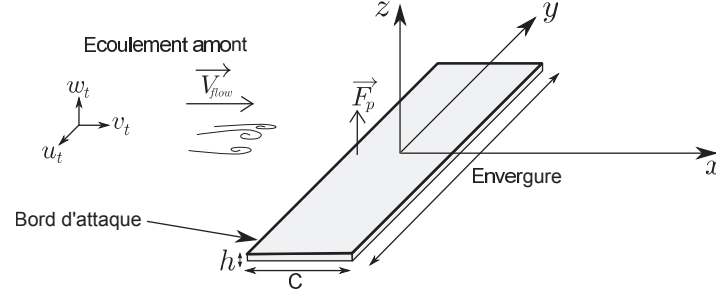


FIGURE 1.17 – Géométrie et notations du modèle analytique de bruit d'impact de bord d'attaque de pale.

Modèle de description de l'écoulement amont

Pour un propulseur, l'écoulement turbulent amont d'une pale est le sillage turbulent de la pale précédente dans la rotation du propulseur. La turbulence de cet écoulement est à l'origine de la composante aléatoire du sillage, elle est caractérisée par le vecteur des variations de vitesse de convection des tourbillons $[u_t, v_t, w_t]^T$, en coordonnées cartésiennes. Différents modèles de description statistique d'un écoulement amont d'un profil hydrodynamique existent [Hinze 1959] : le modèle de Von Kármán [Von Karman 1948] et le modèle de Liepmann [Liepmann 1955] sont adaptés à l'hypothèse simplificatrice de turbulence homogène et isotrope $u_t = v_t = w_t$ qui est supposée ici. Ces modèles simples de description statistique d'un écoulement turbulent donnent une expression analytique de l'autospectre des fluctuations de vitesses particulières d'un écoulement en fonction :

- du taux de turbulence T_u correspondant à la quantité de tourbillons dans l'écoulement en pourcentage, avec l'hypothèse de turbulence homogène :

$$T_u = \frac{\sqrt{\langle u_t^2 \rangle + \langle v_t^2 \rangle + \langle w_t^2 \rangle}}{V_{flow}} \quad (1.5)$$

avec $\langle . \rangle$ l'opérateur de moyenne temporelle et V_{flow} la valeur de la vitesse de l'écoulement selon l'axe x .

- de l'échelle intégrale de turbulence Λ correspondant ici à la longueur de corrélation spatiale longitudinale, selon l'axe x , de la turbulence qui caractérise la taille des plus grands tourbillons d'un écoulement turbulent.

De nombreuses publications traitent de la validation expérimentale de ces modèles analytiques, par exemple Rozenberg a montré récemment que ces modèles étaient bien corrélés avec l'expérience en air [Rozenberg 2007].

Le choix du modèle de Von Kármán est ici adopté pour décrire statistiquement l'écoulement incident d'une pale de propulseur et est justifié par les travaux de Rozenberg en air. Les fluctuations de vitesses particulières utiles pour l'expression des efforts appliqués au profil par la turbulence sont verticales, *i.e.* selon l'axe z orthogonal à la surface de la pale représentée sur la figure 1.17. Considérant un écoulement de turbulence isotrope homogène incident à un profil hydrodynamique, l'autospectre $\phi_{w_t w_t}^K(\omega)$ des fluctuations de vitesses particulières

verticales de l'écoulement, selon Von Kármán [Von Karman 1948], s'exprime par :

$$\phi_{w_i w_i}^K(\omega) = \frac{\langle w_i^2 \rangle \Lambda}{6\pi V_{flow}} \frac{3 + 8 \left(\frac{K_x}{K_e}\right)^2}{\left[\left(1 + \frac{K_x}{K_e}\right)^2\right]^{11/6}} \quad (1.6)$$

Avec K_x le nombre d'onde spatial selon l'axe x de la turbulence incidente

$$K_x = \frac{\omega}{V_{flow}} \quad (1.7)$$

et K_e une constante

$$K_e = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(5/6)}{\Lambda \Gamma(1/3)} \quad (1.8)$$

Γ désigne la fonction mathématique $\Gamma(\cdot)$, uniquement dans cette équation. Cette fonction est définie, pour tout nombre complexe r de partie réelle strictement positive, par :

$$\Gamma(r) = \int_0^{+\infty} t^{r-1} \exp(-t) dt \quad (1.9)$$

Modèle de fluctuations de force de portance

Le modèle de fluctuations de force de portance choisi ici est le modèle de Sears [Sears 1938] dont la pertinence est justifiée pour l'étude des profils compacts par plusieurs auteurs [Blake 1984, Fournier 2009]. La compacité d'un profil hydrodynamique est de deux natures :

- Une compacité acoustique : les dimensions du profil sont très petites devant la longueur d'onde des ondes de pression acoustique mesurées. Pour un profil de corde C et des ondes acoustiques de longueur d'onde λ , Fournier donne une inégalité [Fournier 2009] :

$$C < \lambda \quad (1.10)$$

- Une compacité hydrodynamique : les dimensions du profil sont très petites devant la longueur d'onde hydrodynamique $\frac{U_c}{f}$, U_c étant la vitesse moyenne de convection des tourbillons. La condition de compacité hydrodynamique est :

$$C < \frac{U_c}{f} \quad (1.11)$$

La compacité acoustique justifiera ici le choix d'utilisation du modèle de Sears. L'hypothèse d'une compacité acoustique d'un profil hydrodynamique est valide sur toute la gamme des fréquences de travail, [500Hz;2000Hz]. Il y a également une compacité hydrodynamique dans le résultat de validation qui sera présenté à la fin de cette sous-section.

Sears considère un profil aérodynamique d'envergure infinie et d'épaisseur h nulle (fig. 1.17), seul le nombre d'onde longitudinal (selon x) de la turbulence implique des perturbations de vitesse verticale (selon z) au profil [Sears 1938]. Avec ces hypothèses, le spectre des

fluctuations de force de portance induites par des fluctuations de vitesses verticales d'un profil aérodynamique soumis à un écoulement turbulent s'exprime par :

$$\|\vec{F}_p\|(\omega) = \pi\rho CV_{flow} w_t(K_x, \omega) S_e\left(\frac{K_x C}{2}\right) \quad (1.12)$$

avec ρ la densité du fluide, $w_t(K_x, \omega)$ le spectre en nombre d'onde longitudinal de la vitesse verticale de la turbulence modélisé par l'équation (1.6) et S_e la fonction aérodynamique de Sears définie dans le paragraphe suivant. Les fluctuations de force de portance \vec{F}_p données par l'équation (1.12) constituent la source hydroacoustique de bord d'attaque et produisent un rayonnement dipolaire orthogonal à la surface de la pale, comme décrit par l'équation (1.4). Elles sont orientées selon l'axe z , orthogonalement à la surface de la pale, comme représenté sur la figure 1.17.

La fonction d'influence aérodynamique S_e proposée par Sears renseigne sur la phase du spectre de fluctuations de portance relativement à des perturbations évaluées à la moitié de la corde du profil [Sears 1938, Blake 1986] par :

$$S_e\left(\frac{K_x C}{2}\right) = \frac{j\frac{2}{\pi}\left(\frac{2}{K_x C}\right)}{H_1^{(2)}\left(\frac{K_x C}{2}\right) + jH_0^{(2)}\left(\frac{K_x C}{2}\right)} \quad (1.13)$$

où $H_0^{(2)}$ et $H_1^{(2)}$ désignent les fonctions de Hankel de deuxième espèce d'ordre 0 et 1 [Abramowitz 1964]. Une représentation dans le plan complexe de la fonction d'influence $S_e(\cdot)$ de Sears est présentée sur la figure 1.18 à titre d'illustration, en fonction de la fréquence réduite notée f_r définie dans l'article de Sears [Sears 1938].

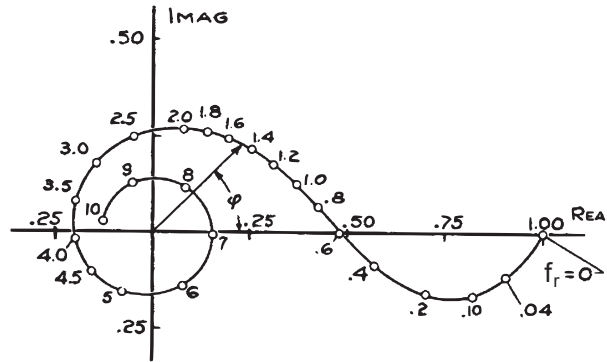


FIGURE 1.18 – Fonction d'influence de Sears en fonction de la fréquence réduite f_r . Cette figure est extraite de l'article de Sears [Sears 1938].

Récapitulatif de la méthodologie

La figure 1.19 présente les différentes étapes de la méthode permettant de simuler la source de bruit d'impact du bord d'attaque d'une pale avec la turbulence. Il est nécessaire de décrire l'écoulement amont turbulent de la pale (eq. (1.6)) et la fonction d'influence hydrodynamique (eq. (1.13)) qui régit les fluctuations de la force de portance \vec{F}_p (eq. (1.12)). Si

les hypothèses de compacité acoustique et de compacité hydrodynamique sont vérifiées, la source de force fluctuante sera modélisée comme dipolaire comme décrit par l'équation (1.4). La source hydroacoustique de propulseur de ce simulateur est donc modélisée par la source

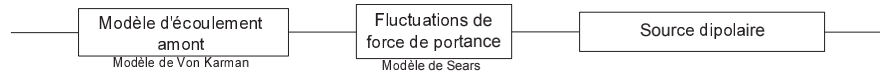


FIGURE 1.19 – Méthodologie de calcul du bruit rayonné par l'interaction fluide-structure de bord d'attaque ou de bord de fuite.

de bruit d'impact du bord d'attaque d'une seule pale.

1.3.2.2 Simulation d'une source de bruit de bord d'attaque de pale

Le modèle analytique de rayonnement du bord d'attaque est validé en utilisant des données issues de la bibliographie. Roger et Moreau ont effectué des mesures de validation en soufflerie anéchoïque, une des configurations expérimentales qu'ils ont réalisée est la suivante [Roger 2010] :

- Profil aérodynamique optimisé de corde $C = 13\text{cm}$, d'épaisseur relative $\frac{h}{C} = 4\%$
- écoulement amont : Une grille de turbulence produit en amont une turbulence homogène et isotrope avec un taux de turbulence $T_u = 5\%$ et une longueur d'échelle intégrale $\Lambda = 0,9\text{cm}$. Les vitesses d'écoulement V_{flow} testées sont : 20m.s^{-1} et 30m.s^{-1} .
- Microphone pour la mesure de pression acoustique en champ lointain à une distance de 1,3m du profil dans la direction normale à la surface du profil.

Au cours de ces mesures, la turbulence a été mesurée en utilisant un fil chaud en aval de la grille de turbulence. Dans sa thèse, Rozenberg a montré que le modèle de Von Kármán pour la description de l'écoulement amont turbulent est bien corrélé avec les mesures [Rozenberg 2007]. Les fluctuations de force de portance sont ici calculées par l'équation (1.12) selon le modèle de Sears.

Spectre de pression acoustique rayonnée en champ lointain

Dans leur expérience, Roger et Moreau ont mesuré l'acoustique rayonnée par le bord d'attaque du profil. Sur la figure 1.20, les résultats expérimentaux sont représentés en traits continus [Roger 2010] et les résultats obtenus par le modèle de Sears, *i.e.* par l'équation (1.12) avec un rayonnement dipolaire, sont représentés en pointillés. Du fait de sa simplicité, le modèle de Sears ne donne qu'un gabarit spectral. Pour ce cas de validation, les résultats obtenus par le modèle de Sears sont ici recalés en niveau avec les résultats expérimentaux à $f = 1000\text{Hz}$. En pratique, lorsque cette source de bruit de bord d'attaque sera simulée, le niveau maximal de l'autospectre de cette source sera choisie selon l'importance que l'utilisateur veut donner à cette source.

L'autospectre obtenu par le modèle de Sears approche bien le spectre mesuré (—) d'après la figure 1.20. En effet, bien que l'estimation par le modèle de Sears présente des écarts de

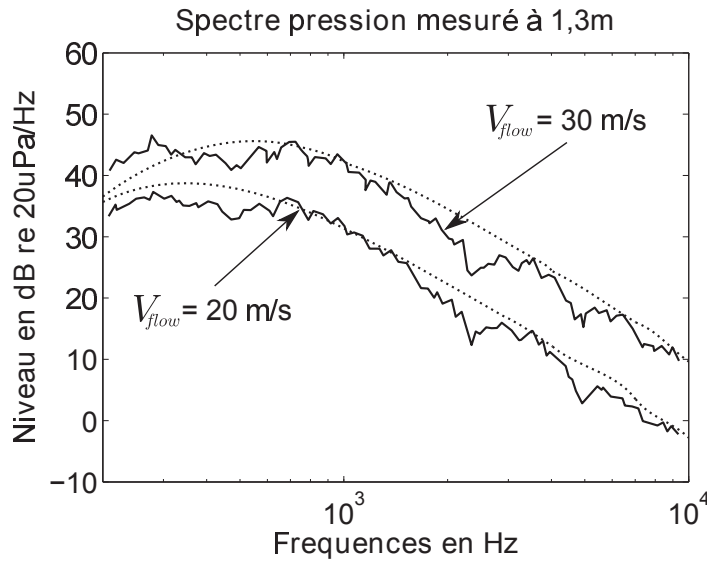


FIGURE 1.20 – Autospectre de pression acoustique rayonnée à 1,3 mètres d'un profil aérodynamique pour différentes vitesses d'écoulement [Roger 2010]. Résultats expérimentaux (—) et modèle de Sears (···).

niveau de 5 dB à 10 dB par rapport au spectre mesuré, l'autospectre du modèle de Sears, est caractéristique d'une "bosse de bruit" (fig. 1.5), avec des valeurs de pentes de croissance et décroissance très proches de celles du spectre mesuré. Ainsi, le gabarit spectral exprimé par le modèle de Sears fournit une bonne estimation de la composante large bande de la pression acoustique rayonnée par le bord d'attaque d'un profil hydrodynamique.

En accord avec les objectifs fixés pour la construction du simulateur, ces résultats expérimentaux confirment que le modèle de Sears, qui est simple et approché, permet de fournir une représentation moyenne du gabarit d'autospectre réaliste. Le réalisme de ce modèle a été validé par des données expérimentales de la littérature.

1.3.3 Modélisation simplifiée d'une source vibroacoustique associée aux sources internes

Cette sous-section concerne la modélisation analytique d'une plaque vibrante pour simuler les sources vibroacoustiques associées aux sources internes de navire de surface, dont le choix a été motivé en introduction de la présente section. La coque d'un navire rayonne un champ de pression acoustique lorsqu'elle est mise en vibrations et que certaines conditions sont vérifiées (fréquence critique, angle d'incidence des ondes acoustiques d'excitation, etc) [Lesueur 1988, Pierce 1989, Skelton 1997]. Les sources internes qui excitent la carène correspondent à tous les phénomènes physiques existant à l'intérieur du bâtiment responsables d'un rayonnement vibroacoustique de la carène dans l'eau. Ces sources internes sont toutes les machines internes au bâtiment (moteur, machines auxiliaires, arbre de propulseur, etc)

excitant la coque vibratoirement par le biais de leur plots et acoustiquement par transfert aérien, comme présenté dans le paragraphe 1.2.3.2.

1.3.3.1 Modélisation de la réponse vibratoire d'une plaque finie, simplement appuyée et non bafflée

Un modèle analytique simple de structure vibrante ayant un comportement proche d'une carène de navire de surface est le modèle de plaque vibrante. Ce modèle ne rend pas compte du comportement vibratoire d'une carène réelle mais il s'en rapproche et permet de simuler un ensemble de sources de type vibroacoustique. Pour que le calcul analytique soit possible, le modèle de plaque utilisé est celui de plaque mince, simplement appuyée et non bafflée :

- La condition de plaque mince suppose uniquement des ondes de flexion, *i.e.* les déplacements vibratoires des points de la plaque sont normaux à la surface de la plaque,
- La condition de simple appui impose des déplacements vibratoires nuls aux bords de la plaque mais une rotation possible [Leissa 1969],
- La condition de non baffle permet aux ondes acoustiques rayonnées par les vibrations de la plaque des deux côtés de la plaque d'interagir.

Le paragraphe suivant détaille la méthodologie pour le calcul analytique de la réponse vibratoire d'une plaque mince, simplement appuyée et non bafflée.

Le calcul du champ vibratoire d'une plaque rectangulaire, finie, simplement appuyée et non bafflée est analytique et détaillé dans l'article de Laulagnet [Laulagnet 1989]. La géométrie d'une plaque rectangulaire est séparable, c'est-à-dire que le champ vibratoire peut se décomposer en un produit de fonctions qui dépendent chacune d'une variable, une transformée de Fourier spatiale des vibrations de la plaque est alors possible. Par exemple, un champ de déplacements vibratoires $w_p(x, y, f)$ est à variables séparables s'il peut s'écrire comme :

$$w_p(x, y, f) = h_1(x)h_2(y)h_3(f) \quad (1.14)$$

avec $h_n, n = 1..3$ des fonctions complexes continues. Dans le cas de la plaque rectangulaire, le champ vibratoire est donc totalement décrit par des modes orthogonaux définis par des nombres d'ondes (k_x, k_y, k_z) , la réponse vibratoire est ainsi calculée par la méthode modale [Lesueur 1988, Pierce 1989]. La méthodologie développée ici pourra donc être adaptée à tout autre cas d'application à géométrie séparable (cylindre, sphère).

Dans ce qui suit, la dépendance en fréquence des différentes variables sera omise pour des raisons de clarté d'écriture, le champ de déplacement vibratoire de la plaque $w_p(x, y), \forall (x, y) \in \Sigma$ est donc calculé analytiquement pour une fréquence f .

Réponse vibratoire d'une plaque simplement appuyée et non bafflée

Les paramètres géométriques et les notations utiles au modèle analytique de plaque sont représentés sur le schéma de la figure 1.21.

Le déplacement vibratoire $w_p(x, y)$ d'un point $S(x, y, 0)$ de la plaque vibrante est régi par

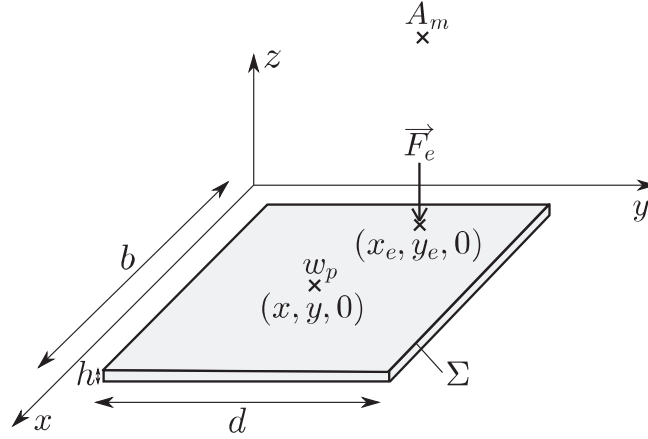


FIGURE 1.21 – Géométrie et notations du modèle analytique de plaque vibrante.

l'équation du mouvement :

$$D\nabla^4 w_p(x, y) - \omega^2 M_s w_p(x, y) = \|\vec{F}_e\| \delta(x - x_e) \delta(y - y_e) - p_s(x, y, 0) \quad (1.15)$$

avec

– l'opérateur différentiel :

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (1.16)$$

– l'opérateur de raideur D , exprimé en fonction du module de Young de la plaque E , de l'épaisseur de la plaque h , du coefficient de Poisson de la plaque ν , par :

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (1.17)$$

– la masse surfacique de la plaque M_s , exprimée en fonction de la densité de la plaque ρ_{pla} :

$$M_s = \rho_{\text{pla}} h \quad (1.18)$$

Le terme de droite de l'équation (1.15) correspond aux excitations qui peuvent être de diverses natures comme évoqué dans la sous-section 1.2.1. Les excitations de la carène par les machines internes sont par exemple :

- Une force ponctuelle \vec{F}_e en un point de la plaque qui modélise une machine interne vibrante posée à l'intérieur du navire
- Une excitation par une onde acoustique rayonnée par une machine interne qui génère une pression pariétale $p_s(x, y, 0)$ sur la surface interne de la carène

Nous choisissons une excitation par une force ponctuelle d'amplitude $\|\vec{F}_e\|$ appliquée en un point $M_e(x_e, y_e, 0)$ de la plaque pour modéliser l'excitation d'une machine interne vibrante. L'hypothèse de plaque mince implique que la force \vec{F}_e est orientée selon l'axe z . Le terme de pression pariétale $p_s(x, y, 0)$ rend compte du couplage existant entre le fluide et la structure. En effet, ce champ de pression non propagatif à proximité de la surface de la plaque dépend du fluide extérieur et influence sa réponse vibratoire [Laulagnet 1998].

L'approche modale consiste à appliquer une transformée de Fourier spatiale sur la surface de la structure, ici selon x et y , à l'équation du mouvement (1.15) sans second membre. La solution modale de l'équation différentielle (1.15) donne les déplacements vibratoires d'un point $S(x, y, 0)$ de la plaque :

$$w_p(x, y) = \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=1}^{+\infty} a_{nm} \Phi_{nm}(x, y) \quad (1.19)$$

Le mode (n, m) est caractérisé par son amplitude a_{nm} et sa déformée Φ_{nm} . La condition aux limites de simple appui impose la forme des déformées modales [Leissa 1969], avec b la dimension de la plaque selon x et d la dimension de la plaque selon y :

$$\Phi_{nm}(x, y) = \sin\left(\frac{n\pi}{b}x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{d}y\right) \quad (1.20)$$

Le nombre d'onde spatial k_{nm} du mode (n, m) est donc :

$$k_{nm} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{d}\right)^2} \quad (1.21)$$

Les amplitudes modales des déplacements vibratoires sont déterminées en utilisant la masse généralisée M_{nm} , la force généralisée F_{nm} et la matrice de couplage intermodal Z_{nmnm} qui sont exprimées dans l'annexe A de l'article de Laulagnet [Laulagnet 1989] et dont les valeurs sont rappelées dans l'annexe A du présent manuscrit. L'amplitude de chaque mode (n, m) s'exprime donc en fonction de la pulsation $\omega = 2\pi f$ et la pulsation modale $\omega_{nm} = k_{nm}.c$ par :

$$a_{nm} = \frac{F_{nm}}{M_{nm}(\omega_{nm}^2 - \omega^2) + j\omega Z_{nmnm}} \quad (1.22)$$

Le couplage de la plaque avec le fluide est contenu dans les termes de couplage intermodal $Z_{nmnm}, \forall (n, m) \in \mathbb{N}^2$. L'eau étant un fluide lourd, le couplage d'une plaque avec l'eau est non négligeable en pratique. Cependant, son calcul étant numérique, il n'est pas pris en compte ici dans cette stratégie de modélisation simple et analytique.

Les déplacements vibratoires exprimés par l'équation (1.19) sont obtenus en remplaçant les amplitudes modales a_{nm} par leur expression déterminée par l'équation (1.22) et les déformées modales $\Phi_{nm}(x, y)$ par leur expression déterminée par l'équation (1.20). L'expression analytique du champ vibratoire par la méthode modale montre que les déformées modales sont des structures cohérentes sur toute la surface de la plaque. Cette propriété implique que tous les déplacements de la plaque sont cohérents.

Champ de pression acoustique rayonné

À la fréquence f associée au nombre d'onde $k = \frac{2\pi f}{c}$, un ensemble d'ondes acoustiques planes est émis par les vibrations de la plaque et est caractérisé chacune par un triplet (k_x, k_y, k_z) lié au nombre d'onde par la relation suivante :

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (1.23)$$

Ainsi, il y a autant d'ondes planes qui existent à la fréquence f que de triplets (k_x, k_y, k_z) vérifiant la relation (1.23). Cette relation implique l'existence de deux types d'ondes émises par les vibrations de la plaque :

- les ondes acoustiques pour lesquelles le nombre d'onde k vérifie l'inégalité $k^2 < k_x^2 + k_y^2$, le nombre d'onde k_z est alors imaginaire pur. Les ondes associées à ces nombres d'ondes k_z ont une amplitude qui décroît exponentiellement, ce sont donc des ondes non propagatives qui restent localisées à proximité de la plaque et sont appelées des ondes évanescentes
- les ondes acoustiques pour lesquelles le nombre d'onde k vérifie l'inégalité $k^2 > k_x^2 + k_y^2$, *i.e.* k_z est réel, qui sont des ondes propagatives qui vont rayonner jusqu'à l'infini en s'atténuant avec la distance de propagation.

Pour cette étude, on suppose que le champ de pression acoustique rayonné par les vibrations de la coque du navire de surface est mesuré suffisamment loin pour qu'aucune onde évanescente ne parvienne à l'antenne de mesure. Cette hypothèse est réaliste en pratique. Le champ de pression acoustique rayonnée par une plaque est alors asymptotiquement déterminé par l'intégrale de Rayleigh [Laulagnet 1998]. L'intégrale de Rayleigh modélise les vibrations comme des sources monopolaires d'amplitudes régies par l'équation (1.2). Considérant une plaque de surface Σ discrétisée en N sources ponctuelles positionnées en des points $S_n, n \in [1, N]$ de la plaque, des éléments surfaciques d'aire $dx.dy$ sont définis autour de ces points sources. Le débit acoustique de la source au point S_n est exprimé en fonction de la valeur de la vitesse vibratoire, *i.e.* la dérivée temporelle des déplacements de l'équation (1.19) :

$$q(S_n, t) = \frac{\partial w_p(S_n, t)}{\partial t} dx.dy \quad (1.24)$$

Pour rappel, le débit acoustique est exprimé en mètres cube par seconde.

Récapitulatif de la méthodologie

La modélisation analytique d'une plaque mince a permis de mettre en évidence la méthodologie de calcul de la réponse vibroacoustique d'une structure vibrante qui est résumée par la figure 1.22. Le champ vibratoire de la structure est déterminé par l'équation du mouvement et par des conditions aux limites. Le champ de pression acoustique rayonnée est ensuite calculé par l'équation de Rayleigh [Lesueur 1988] à partir de modèle de sources monopolaires ponctuelles associées aux vitesses vibratoires normales de la plaque.

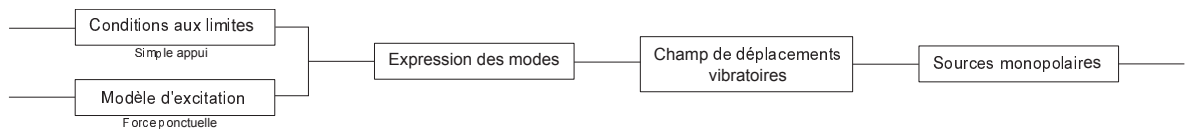


FIGURE 1.22 – Méthodologie de calcul du bruit rayonné par les vibrations d'une plaque mince.

1.3.3.2 Simulation d'une plaque vibrante

Les données utilisées pour valider la modélisation analytique de la réponse vibroacoustique d'une plaque simplement appuyée, non bafflée et non couplée à un fluide sont les calculs analytiques de la réponse vibratoire de plaque présentés par Laulagnet dans son article [Laulagnet 1998]. Ce modèle a servi de référence pour la Commission de Validation des progiciels (CValor), de la Société Française d'Acoustique et la Société Française de la Mécanique, pour valider les modèles numériques de plusieurs logiciels commerciaux.

Paramètres physique du modèle de plaque vibrante

La configuration de validation est une plaque rectangulaire finie de dimensions $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ et d'épaisseur 1 cm , en acier, avec :

- un module d'Young $E = 2.10^{11}(1 + j\eta^2)\text{Pa}$ avec un amortissement structural $\eta = 1\%$,
- un coefficient de Poisson $\nu = 0,3$
- une masse volumique $\rho_{\text{pla}} = 7800\text{kg.m}^{-3}$

Une force ponctuelle d'amplitude 1 N est appliquée au point de coordonnées $(0,7\text{m}; 0,2\text{m})$

Résultats de validation Pour la validation, les déplacements vibratoires sont calculés à partir de l'équation (1.19) puis la vitesse vibratoire quadratique moyenne est calculée sur toute la surface de la plaque par la formule :

$$\langle v_p(\omega)^2 \rangle = \frac{\omega^2}{8} \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=1}^{+\infty} |a_{nm}|^2 \quad (1.25)$$

Le spectre de vitesse quadratique moyenne calculée par l'équation (1.25) est tracé en tirets sur la figure 1.23 et le spectre de vitesse quadratique moyenne calculée analytiquement par Laulagnet [Laulagnet 1998] est représenté en trait continu sur la figure 1.23.

La bonne superposition des résultats avec ceux obtenus par Laulagnet valide l'implémentation de l'expression analytique de la réponse vibratoire d'une plaque simplement appuyée et non bafflée. L'écart de quelques decibels au-delà de 900 Hz avec les résultats de la bibliographie se justifie par un ordre modal de 90, ce qui est moins élevé que la référence [Laulagnet 1989], et un pas fréquentiel plus faible que celui utilisé pour déterminer la courbe en traits continus de la figure 1.23.

Ce modèle de plaque mince non bafflée qui vient d'être validé permettra de simuler des sources vibroacoustiques représentant les sources internes d'un navire de surface.

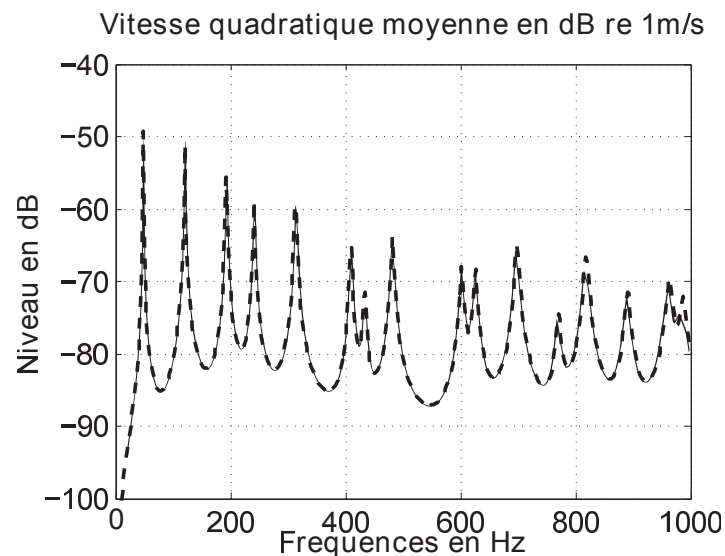


FIGURE 1.23 – Vitesse quadratique moyenne d'une plaque rectangulaire simplement appuyée et non bafflée en acier soumise à une force ponctuelle de 1 N en $(0,7m; 0,2m)$. Résultats analytiques obtenus par l'équation (1.25) (—) et résultat analytique de Laulagnet [Laulagnet 1998] (—).

1.4 Modélisation simplifiée de la propagation acoustique sous-marine pour une source en mouvement

Dans les précédentes sections, les phénomènes physiques responsables du rayonnement d'un champ de pression acoustique par un navire de surface ont été recensés et décrits. Ces différents phénomènes ont été modélisés acoustiquement comme des sources acoustiques équivalentes, caractérisées par un contenu spectral, une localisation et une directivité. Afin de modéliser le rayonnement du champ de pression acoustique produit par un navire, il reste à modéliser la propagation des ondes acoustiques dans l'environnement sous-marin. De nombreux logiciels de simulation numérique existent pour modéliser la propagation sous-marine des ondes acoustiques. Dans ce mémoire, nous faisons le choix du modèle analytique de propagation par rayons, c'est une modélisation simplifiée de la propagation qui est réaliste pour les cas d'application de cette thèse.

Ainsi, dans cette section, un bref état de l'art des modèles de propagation justifie que la théorie des rayons peut être utilisée ici pour décrire la propagation des ondes acoustiques. Puis, nous présentons l'expression analytique de la réponse impulsionnelle d'un milieu de propagation acoustique en présence de sources mobiles, suivant le modèle simple de propagation par rayons. Nous considérons ici un milieu de propagation suffisamment profond ou dont l'absorption du fond est suffisamment grande pour que l'interaction des ondes avec le fond puisse être négligée. Cette hypothèse est réaliste dans les configurations expérimentales envisagées dans cette thèse. La prise en compte d'une réflexion sur la surface air-eau, suppo-

sée parfaitement réfléchissante, est discutée. Enfin, la simulation d'une signature acoustique de navire de surface en mouvement en utilisant les modèles simples de la section 1.3 et de la présente section est présentée et comparée aux données expérimentales de la littérature.

1.4.1 État de l'art

Il existe une variabilité dans la nature de l'environnement de propagation marin en fonction de son emplacement (côtier, hauturier), sa profondeur (petits fonds, grands fonds), des distances considérées et des fréquences de travail. Ces différences d'environnement font qu'il n'est pas possible de considérer une réponse impulsionnelle unique pour les études acoustiques sous-marines et qu'il est nécessaire de modéliser la propagation des ondes acoustiques en fonction des configurations étudiées.

La propagation des ondes acoustiques est régie par l'équation des ondes, ou l'équation de Helmholtz, qui se déduit de l'équation de la conservation de la masse, de l'équation de la conservation de la quantité de mouvement et de l'équation d'état adiabatique. Dépendant de la configuration du milieu de propagation, la propagation des ondes en eau peut être modélisée analytiquement par des modes acoustiques orthogonaux [Hawker 1979] ou par des rayons acoustiques [Jacyna 1976]. La figure 1.24 de Gervaise *et al.* représente schématiquement des ordres de grandeur des domaines d'application de la théorie des modes et la théorie des rayons en fonction de la distance de propagation, de la profondeur et des fréquences de travail. Au vu de la figure 1.24, la description modale de la propagation des ondes

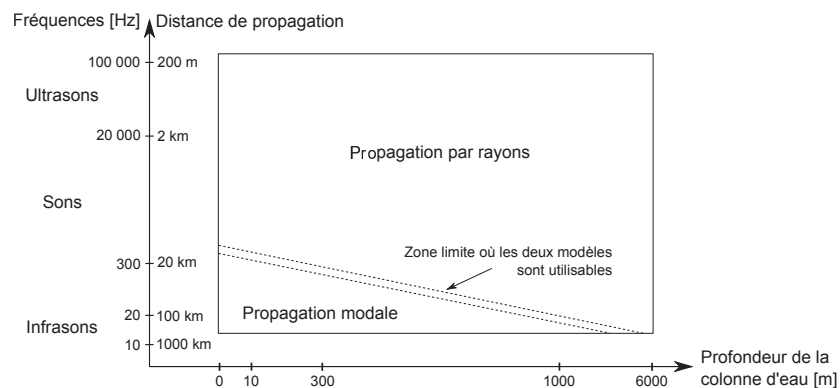


FIGURE 1.24 – Ordre de grandeur des domaines de validité des méthodes de propagation acoustique. Extrait du cours de C. Gervaise [Gervaise 2008].

acoustiques est essentiellement utilisée en basses fréquences et pour des distances de propagation grandes par rapport à la hauteur de la colonne d'eau. En effet, les ondes basses fréquences se propagent sur des longues distances en s'atténuant faiblement. Par conséquent, une onde acoustique émise par une source immergée dans la colonne d'eau va se réfléchir de nombreuses fois sur les interfaces de la colonne d'eau avant d'être reçue par un capteur positionné dans la colonne d'eau. Ces multiples réflexions étant très peu atténuées en basses fréquences, il est plus adapté de décrire la propagation acoustique dans la colonne d'eau

par des modes comme le décrivent Hawker *et al.* [Hawker 1979]. De plus, plus la fréquence des ondes acoustiques qui se propagent est grande, plus le nombre de modes à prendre en compte pour modéliser avec précision la propagation est grand. Théoriquement, la propagation acoustique en hautes fréquences peut être décrite par la théorie des modes en utilisant un nombre de modes qui tend vers l'infini ce qui n'est numériquement pas réalisable.

En hautes fréquences ou pour des colonnes d'eau suffisamment profondes, une onde acoustique émise par une source immergée dans la colonne d'eau va subir quelques réflexions sur les interfaces de la colonne d'eau avant d'être reçue par un capteur. Dans cette configuration, les trajets de propagation étant peu nombreux, il est réaliste de faire l'hypothèse que l'onde acoustique émise par une source se propage selon quelques trajets acoustiques bien séparés dans la colonne d'eau [Jacyna 1976]. L'utilisation de la théorie des rayons est alors possible.

Dans la sous-section suivante, la configuration expérimentale de l'étude sera étudiée afin de déterminer le modèle analytique de propagation le plus adapté pour décrire de façon réaliste la propagation des ondes acoustiques.

1.4.2 Réponse impulsionnelle du milieu de propagation acoustique

Le champ de pression acoustique rayonné par un ensemble de sources en mouvement dans un environnement de propagation acoustique sous-marin s'exprime comme la convolution des signaux temporels des sources avec la réponse impulsionnelle du milieu de propagation, comme le schématise la figure 1.25. La réponse impulsionnelle du milieu de propagation contient uniquement les propriétés de la propagation des ondes acoustiques et est indépendante des signaux des sources. Elle intègre donc l'effet du mouvement des sources et les propriétés de propagation des ondes acoustiques dans le milieu.

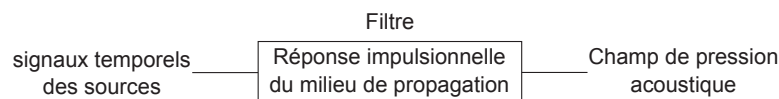


FIGURE 1.25 – Schéma représentant le milieu de propagation acoustique comme un filtre des signaux des sources.

Dans cette sous-section, la configuration expérimentale et les hypothèses d'étude sont d'abord présentées. Ensuite, les modèles de propagation acoustique issus de la théorie des rayons, en présence de sources fixes et de sources mobiles, sont présentés. Enfin, lorsque des conditions aux limites sont connues *a priori*, il est possible de les prendre en compte dans la modélisation de la réponse impulsionnelle. Le cas de la prise en compte d'une interface parfaitement réfléchissante est présentée et permet de modéliser la réflexion à la surface.

1.4.2.1 Géométrie du problème de propagation : Hypothèses d'étude

Dans cette étude, nous considérons le problème d'un navire de surface passant à la vitesse $\|\vec{v}\| \in [2m.s^{-1}; 5m.s^{-1}]$ au-dessus d'une antenne d'hydrophones immergée à 10 mètres de profondeur et distante de la trajectoire du navire de 2,50 m selon y. On suppose que le tirant d'eau du navire, *i.e.* la profondeur d'immersion de la coque, est de un mètre. Cette valeur est un bon ordre de grandeur du tirant d'eau de la maquette de navire de surface de la campagne de mesures au lac de Castillon présentée dans le chapitre 3. La trajectoire du navire est parallèle à l'antenne linéaire de mesures et est colinéaire à l'axe x. Le navire de surface a une longueur de 21,5 mètres et est aligné avec l'axe x. L'antenne de mesures est constituée de 9 hydrophones équidistants de 50 cm, elle a donc une envergure de $L_A = 4m$.

Pour cette géométrie, l'antenne linéaire a pour bande passante $[375Hz; 1500Hz]$. La fréquence basse de la bande passante de cette antenne selon x est déterminée par son envergure dans cette direction. La fréquence basse est associée à la longueur d'onde égale à l'envergure de l'antenne, ici pour une célérité de $1500m.s^{-1}$:

$$f_{min} = \frac{c}{L_A} = 375Hz \quad (1.26)$$

La fréquence haute de la bande passante de l'antenne est déterminée par l'échantillonnage spatiale de l'antenne, la plus petite longueur d'onde mesurée par l'antenne avant repliement spectral est la longueur d'onde égale à deux fois l'espacement inter-capteur.

$$f_{max} = \frac{c}{2 \times 0,5} = 1500Hz \quad (1.27)$$

En pratique, les traitements d'antenne possèdent des performances moindres à la fréquence f_{min} et le repliement spectral ne perturbe pas les traitements d'antenne pour une grille de calcul de taille raisonnable à la fréquence f_{max} . La bande fréquentielle de travail est donc choisie égale à $[500Hz; 2000Hz]$ pour cette configuration d'étude, ce qui correspond à une bande fréquentielle pour laquelle il n'y a pas de repliement spectral.

La figure 1.26 représente la géométrie du problème de l'étude.

Le milieu de propagation est supposé homogène, avec une surface réfléchissante et isocélère, les ondes acoustiques se propagent donc avec une célérité constante et nous qualifierons ainsi ce milieu de milieu *semi-infini*. L'interface eau-air constitue une zone de rupture d'impédance, les ondes acoustiques passent d'un milieu de célérité $c_{eau} = 1500m.s^{-1}$ à un milieu de célérité très différente $c_{air} = 340m.s^{-1}$. Cette interface est donc considérée parfaitement réfléchissante, *i.e.* avec un coefficient de réflexion égal à -1 .

Nous nous intéressons à des milieux d'environ 100 mètres de profondeur, avec une antenne immergée en-dessous du navire de surface au passage et pour de faibles distances de mesures de 10 mètres à 20 mètres. Les traitements acoustiques sont réalisés pour des sources émettant dans une bande fréquentielle $[500Hz; 2000Hz]$. L'environnement de mesures est supposé homogène, *i.e.* de densité constante et de célérité constante. Dans ce cadre, les hypothèses de la théorie des rayons sont donc vérifiées et la propagation des ondes acoustiques sera modélisée à l'aide de cette théorie.

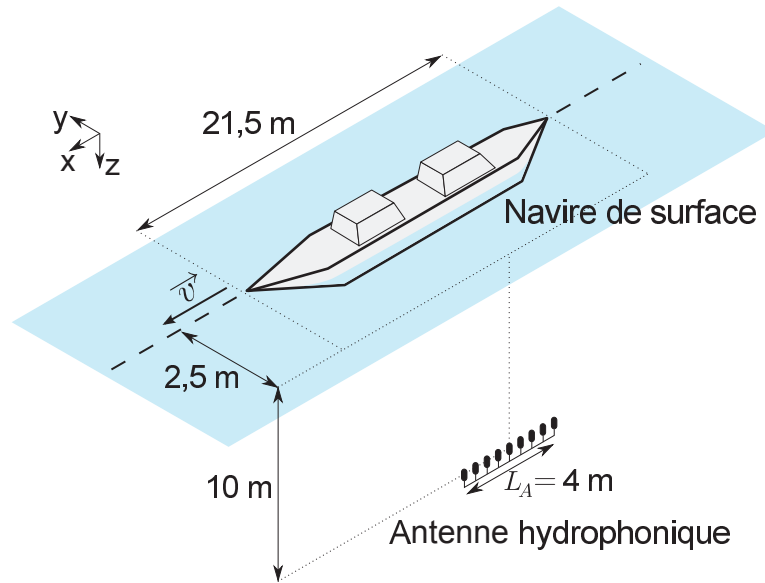


FIGURE 1.26 – Géométrie du problème de l'étude. Navire de surface au passage au-dessus d'une antenne d'hydrophone, la surface eau-air est représentée en bleu et supposée parfaitement réfléchissante.

1.4.2.2 Prise en compte de la mobilité des sources

Le mouvement relatif entre les sources acoustiques et l'antenne de mesure implique [Morse 1968] :

1. Une conséquence géométrique, le déplacement relatif entre les sources et l'antenne,
2. Une conséquence acoustique, la variation de distance de propagation entre les sources et l'antenne engendre un phénomène de compression-dilatation du signal source reçu au niveau de l'antenne ainsi qu'une modulation en amplitude.

Le phénomène de compression-dilatation du signal temporel de la source mobile lors de sa propagation, appelé *effet Doppler*, introduit les notions importantes d'échelle de temps d'émission et d'échelle de temps de réception. La figure 1.27 représente l'effet Doppler affectant un signal $p(S_n, \tau)$ d'une source mobile au point S_n émettant un signal sinusoïdal à l'instant d'émission τ et reçu au niveau d'un microphone A_m à l'instant de réception t . Pour une source mobile à vitesse non nulle, les échantillons temporels émis régulièrement par une source à des instants τ ne sont pas reçus de façon régulière au niveau d'un microphone positionné en un point de l'espace à des instants t .

Physiquement, l'effet Doppler est dû au fait que, lors du mouvement, le retard associé à la propagation des ondes acoustiques émises par une source dépend du temps, la fréquence du signal mesuré est alors celle du signal source décalée au cours du temps. Le schéma de la figure 1.28 illustre ce principe : dans le cas de la figure de gauche, le signal mesuré au niveau du récepteur possède la même fréquence que le signal source ; dans le cas de la figure de droite, la fréquence du signal mesuré au niveau du récepteur est diminuée au cours

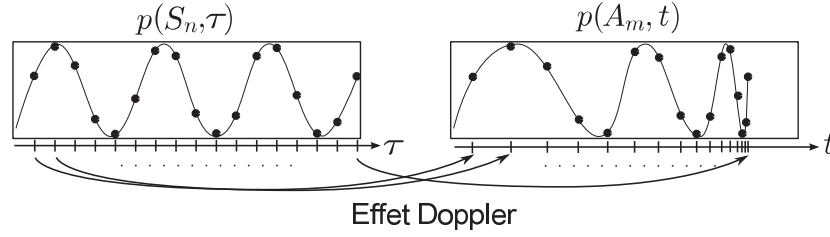


FIGURE 1.27 – Schéma de l'effet Doppler affectant un signal source sinusoïdal $s(S_n, \tau)$ mesuré au niveau d'un microphone A_m . Échelle des temps d'émission τ et échelle des temps de réception t .

du temps (dilatation des fronts d'onde) lorsque la source s'éloigne du récepteur. La mobilité

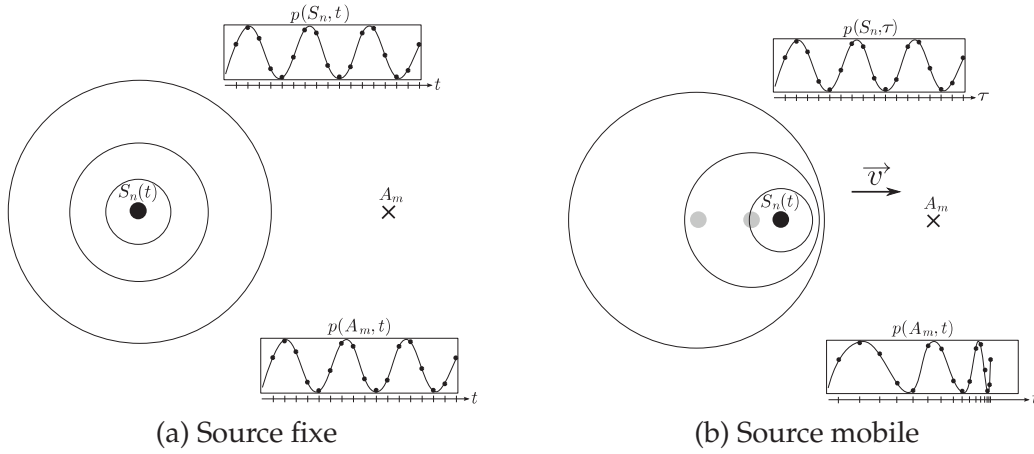


FIGURE 1.28 – Schéma des fronts d'ondes acoustiques d'une source immobile en présence d'un récepteur (cercles noirs). Schéma du signal émis par la source et du signal mesuré par le récepteur (en encadré).

des sources est prise en compte dans la réponse impulsionnelle de l'environnement de propagation (fig. 1.25). En effet, une réponse impulsionnelle acoustique lie un point source S_n un point de mesure A_m . La mobilité du point source $S_n(\tau)$ se traduit par une dépendance temporelle des coordonnées de celui-ci. Ainsi, la mobilité des source se traduit mathématiquement par une caractéristique de l'environnement de propagation.

Dans le cas d'une source mobile de vecteur vitesse \vec{v} , la géométrie du problème est celle représentée par le triangle des vecteurs position de la figure 1.29.

Considérant un point de mesure A_m et un point source mobile S_n (fig. 1.29), la distance de propagation entre un point source mobile $S_n(\tau)$ à l'instant d'émission τ et un point de mesure fixe $A_m(t)$ à l'instant de réception t est la suivante :

$$\left\| \overrightarrow{S_n(\tau)A_m(t)} \right\| = (t - \tau) \cdot c \quad (1.28)$$

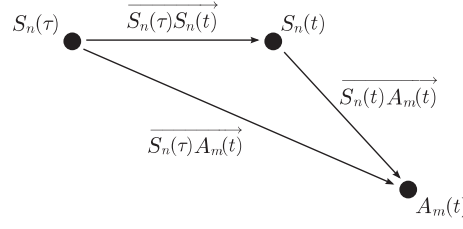


FIGURE 1.29 – Géométrie du problème de propagation acoustique. Triangle des vecteurs position au cours du temps.

D'après l'équation (1.28), l'équation du retard liant l'échelle des temps d'émission τ et l'échelle des temps de réception t est :

$$t = \tau + \frac{\| \overrightarrow{S_n(\tau)A_m(t)} \|}{c} \quad (1.29)$$

Équation des ondes

Avec les hypothèses précédentes, le champ de pression acoustique $p(A_m(t), t)$ mesuré en un point A_m à l'instant t et généré par une source monopolaire ponctuelle localisée au point $S_n(t)$ de vitesse v est régi par l'équation des ondes [Morse 1968] :

$$\nabla^2 p(A_m, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(A_m, t)}{\partial t^2} = -\rho \frac{\partial}{\partial t} q(S_n(t), t) \quad (1.30)$$

avec $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ et $q(S_n(t), t)$ le débit acoustique de la source (éq. (1.2)). Pour exprimer le champ de pression rayonnée par la source monopolaire, il faut que le membre de droite de l'équation des ondes ne soit pas une pression acoustique équivalente rayonnée à un mètre qui est affectée par l'effet Doppler mais la valeur de son débit acoustique. Pour résoudre ce problème, le potentiel de vitesse acoustique $\psi(A_m, t)$ au point A_m est défini comme étant :

$$p(A_m, t) = \frac{\partial \psi(A_m, t)}{\partial t} \quad (1.31)$$

L'équation des ondes régissant le potentiel acoustique $\psi(A_m, t)$ au point A_m générée par la source de débit volumique $q(S_n(t), t)$ au point $S_n(t)$ est la suivante :

$$\nabla^2 \psi(A_m, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi(A_m, t)}{\partial t^2} = -\rho q(S_n(t), t) \quad (1.32)$$

Pour une source de vitesse subsonique, *i.e.* $Ma < 1$, le potentiel acoustique s'exprime par :

$$\psi(A_m, t) = \rho g(A_m, t | S_n(\tau), \tau) * q(S_n(t), t) \quad (1.33)$$

avec $g(A_m, t | S_n(\tau), \tau)$ la réponse impulsionnelle du milieu de propagation liant un point source monopolaire mobile $S_n(\tau)$ à un point de mesure A_m . Le champ de pression acoustique rayonné en A_m par une source monopolaire en S_n s'écrit donc analytiquement, d'après l'équation (1.31) :

$$p(A_m, t) = \rho \frac{\partial}{\partial t} [g(A_m, t | S_n(\tau), \tau) * q(S_n(t), t)] \quad (1.34)$$

Morse et Ingard donnent également l'expression du champ acoustique rayonné par une source dipolaire de fluctuations de force $\vec{F}(s_n, t)$ par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} p(A_m, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[g(A_m, t | S_n(\tau), \tau) * (\vec{F}(S_n(t), t) \cdot \vec{x}) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[g(A_m, t | S_n(\tau), \tau) * (\vec{F}(S_n(t), t) \cdot \vec{y}) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[g(A_m, t | S_n(\tau), \tau) * (\vec{F}(S_n(t), t) \cdot \vec{z}) \right] \end{aligned} \quad (1.35)$$

avec \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z les vecteurs directeurs unitaires des axes x, y et z.

Réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle $g(A_m, t | S_n(\tau), \tau)$ du milieu de propagation liant un point source mobile $S_n(\tau)$ à un point de mesure A_m s'écrit comme la solution de l'équation des ondes avec une source d'amplitude unitaire et spatialement ponctuelle au point $S_n(\tau)$ comme terme d'excitation :

$$\nabla^2 g(A_m, t | S_n(\tau), \tau) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 g(A_m, t | S_n(\tau), \tau)}{\partial t^2} = \delta(S - S_n(\tau)) \quad (1.36)$$

Cette réponse impulsionnelle décrit totalement le transfert acoustique entre la pression acoustique au point source $S_n(\tau)$ et la pression acoustique au point de mesure $A_m(t)$. $g(A_m, t | S_n(\tau), \tau)$ est donc une *réponse impulsionnelle pression-pression*. En tenant compte des conditions aux limites du problème, la solution de l'équation (1.36) est de la forme [Morse 1968, Goldstein 1976, Jacyna 1976, Rienstra 2004] :

$$g(A_m, t | S_n(\tau), \tau) = \frac{\delta \left(t - \tau - \frac{\|\overrightarrow{S_n(\tau)A_m(t)}\|}{c} \right)}{A(A_m, t | S_n(\tau), \tau)} \quad (1.37)$$

Il faut donc déterminer le facteur d'atténuation $A(A_m, t | S_n(\tau), \tau)$ et la distance de propagation $\|\overrightarrow{S_n(\tau)A_m(t)}\|$ avec une dépendance uniquement à l'instant de réception t .

Détermination de la distance de propagation

D'après l'équation (1.28) et le schéma de la figure 1.29, le carré de la distance de propagation entre le point source $S_n(\tau)$ à l'instant d'émission τ et le point de mesure A_m à l'instant t :

$$\begin{aligned} (t - \tau)^2 \cdot c^2 &= \left\| \overrightarrow{S_n(\tau)A_m(t)} \right\|^2 \\ &= \left\| \overrightarrow{S_n(\tau)S_n(t)} + \overrightarrow{S_n(t)A_m(t)} \right\|^2 \\ &= \left\| \vec{v} \cdot (t - \tau) + \overrightarrow{S_n(t)A_m(t)} \right\|^2 \end{aligned} \quad (1.38)$$

Le vecteur de Mach de la source est défini par $\vec{Ma} = \frac{\vec{v}}{c}$ et le nombre de Mach $\|\vec{Ma}\|$ est la norme du vecteur de Mach. D'après l'équation (1.38), une équation du second degré d'inconnue $(t - \tau) \cdot c$ est obtenue :

$$0 = - \left[\frac{\|\overrightarrow{S_n(t)A_m(t)}\|}{c} \right]^2 - 2 \frac{\vec{Ma}}{c} \cdot \overrightarrow{S_n(t)A_m(t)} (t - \tau) + (1 - \|\vec{Ma}\|^2) (t - \tau)^2 \quad (1.39)$$

Pour un mouvement subsonique, *i.e.* de nombre de Mach $\|\vec{Ma}\| < 1$, la solution de l'équation (1.39) est la distance entre le point source mobile $S_n(\tau)$ et le point fixe de mesure A_m et s'écrit [Morse 1968, Jacyna 1976] :

$$\|\vec{S_n(\tau)A_m(t)}\| = \frac{\vec{Ma} \cdot \vec{S_n(t)A_m(t)} + \sqrt{[\vec{Ma} \cdot \vec{S_n(t)A_m(t)}]^2 + (1 - \|\vec{Ma}\|^2) \|\vec{S_n(t)A_m(t)}\|^2}}{1 - \|\vec{Ma}\|^2} \quad (1.40)$$

On retrouve le cas particulier de sources fixes pour lequel la position du point S_n ne dépend pas du temps lorsque le nombre de Mach de la source est nul, $\|\vec{Ma}\| = 0$.

Détermination du facteur d'atténuation de propagation

Pour une propagation en ondes planes, les sources sont considérées lointaines et les ondes acoustiques qu'elles rayonnent vers l'antenne ne présentent pas de fluctuation d'amplitude au niveau de chaque capteur :

$$A(A_m, t | S_n(\tau), \tau) = 1 \quad (1.41)$$

Pour une propagation sphérique des ondes acoustiques, le facteur d'atténuation $A(A_m, t | S_n(\tau), \tau)$ tenant compte du mouvement quelconque du point source $S_n(\tau)$ se calcule à l'aide de l'équation (1.42) [Morse 1968] :

$$A(A_m, t | S_n(\tau), \tau) = -4\pi \|\vec{S_n(\tau)A_m(t)}\| \cdot \left| 1 - \vec{Ma} \cdot \frac{\vec{S_n(\tau)A_m(t)}}{\|\vec{S_n(\tau)A_m(t)}\|} \right| \quad (1.42)$$

La propagation en ondes sphériques a lieu lorsque la distance de mesure, *i.e.* la distance entre le capteur central de l'antenne et la source, est inférieure à la distance de Fresnel [Elias 1983] :

$$D_f = \frac{L_A^2}{\lambda} \quad (1.43)$$

avec L_A l'envergure de l'antenne et λ la plus petite longueur d'onde de travail. Ici, la géométrie de l'étude décrite dans le paragraphe 1.4.2.1 impose une distance de mesure au plus proche de l'antenne de :

$$\sqrt{2,5^2 + 10^2} \approx 10,31m \quad (1.44)$$

La distance de Fresnel est supérieure à la distance de mesure pour des fréquences :

$$f \geq \frac{10,31.c}{L_A^2} \approx 966Hz \quad (1.45)$$

Pour la bande fréquentielle de travail [500Hz; 2000Hz] choisie, une modélisation de la propagation acoustique par des ondes sphériques est choisie pour avoir un modèle réaliste de propagation. Par ailleurs, dans la configuration de l'étude décrite dans le paragraphe 1.4.2.1, le nombre de Mach est faible $\|\vec{Ma}\| \approx 10^{-3}$ et module donc peu l'amplitude du signal acoustique propagé [Fournier 1990]. On a donc l'expression du facteur d'atténuation de propagation suivant :

$$A(A_m, t | S_n(\tau), \tau) \approx -4\pi \|\vec{S_n(\tau)A_m(t)}\| \quad (1.46)$$

Champ de pression acoustique rayonnée par une source ponctuelle en mouvement quelconque

À partir de l'expression de la réponse impulsionnelle décrivant la propagation des ondes acoustiques émises par une source acoustique ponctuelle de mouvement quelconque de vecteur de Mach \vec{Ma} , le champ de pression acoustique rayonné au point de mesure A_m est :

- Pour une source monopolaire de débit $q(S_n(t), t)$, d'après l'équation (1.34) :

$$p(A_m, t) = - \frac{\rho \cdot q \left(S_n(\tau), t - \frac{\|\vec{S_n(\tau)A_m(t)}\|}{c} \right)}{4\pi \|\vec{S_n(\tau)A_m(t)}\|} \quad (1.47)$$

- Pour une source dipolaire de force $\vec{F}(S_n(t), t)$, d'après l'équation (1.35) :

$$p(A_m, t) = \frac{\rho \cdot \left(\frac{\vec{F}(S_n(\tau), \tau)}{\|\vec{F}(S_n(\tau), \tau)\|} \cdot \frac{\vec{S_n(\tau)A_m}}{\|\vec{S_n(\tau)A_m}\|} \right) \frac{\partial \|\vec{F}(S_n(t), t)\|}{\partial t}(\tau)}{4\pi c \|\vec{S_n(\tau)A_m(t)}\|} \quad (1.48)$$

Le produit scalaire du numérateur décrit la directivité du dipôle (fig. 1.16).

1.4.2.3 Présence d'interfaces réfléchissantes entre deux milieux homogènes

En milieu marin et selon la théorie des rayons, les ondes acoustiques émises par une source acoustique sous-marine se propagent vers un récepteur le long d'un trajet direct mais également de trajets réfléchis. Les interfaces réfléchissantes que peuvent rencontrer les ondes acoustiques sont principalement le fond (interface eau-sédiments) et la surface (interface eau-air). La présente étude concerne un environnement de propagation pour lequel la zone de mesures est localisée à proximité de la surface. Par conséquent, les réflexions sur le fond marin seront ici négligées au vu des pertes de transmission appliquées au trajet réfléchi par le fond et du coefficient de réflexion au fond $|\mathcal{R}| < 1$. La réflexion sur la surface est classiquement supposée parfaite au vu de l'importante rupture d'impédance entre l'air et l'eau [Ross 1976, Jensen 2011]. En effet, l'expression du coefficient de réflexion est :

$$\mathcal{R} = - \frac{Z - 1}{Z + 1} \approx -1 \quad (1.49)$$

avec Z l'impédance entre l'air et l'eau $Z \approx 3600$. Selon la théorie des rayons, le trajet d'une onde acoustique émise par une source ponctuelle S_n et réfléchi par la surface se modélise géométriquement par le trajet direct de la même onde acoustique émise par une source image correspondant à une source virtuelle positionnée symétriquement par rapport à la surface. Les ondes acoustiques émises par la source image sont pondérées par le coefficient de réflexion \mathcal{R} . La réflexion sur la surface est ici prise en compte comme une propriété de propagation et introduite dans l'expression de la réponse impulsionnelle. La réponse impulsionnelle associée au point source S_n et au point de mesure A_m s'exprime comme suit avec \mathbf{g}_d la réponse impulsionnelle correspondant au trajet direct :

$$\mathbf{g}(A_m, t | S_n(\tau), \tau) = \mathbf{g}_d(A_m, t | S_n(\tau), \tau) + \mathcal{R} \mathbf{g}_d(A_m, t | D_n(\tau), \tau) \quad (1.50)$$

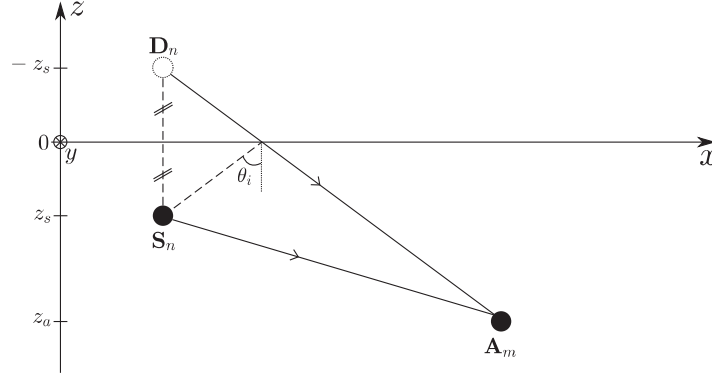


FIGURE 1.30 – Méthode géométrique des sources images. Source physique au point S_n et son image géométrique au point D_n symétrique par rapport au plan réfléchissant (xOy). L'angle θ_i d'incidence des ondes acoustiques émises par la source et réfléchies sur la surface est représenté ici pour un cas particulier où les points S_n et A_m sont contenus dans le plan (xOz).

avec $\mathcal{R} = -1$ dans notre étude. L'interface eau-air d'un environnement marin est parfois rugueuse à cause des intempéries et des phénomènes marins pouvant perturber l'état de surface. Cette rugosité influence la valeur du coefficient de réflexion et peut induire des phénomènes de diffraction en fonction de la longueur d'onde λ des ondes acoustiques étudiées. Ross donne une loi grossière pour pouvoir faire l'hypothèse d'une interface air-eau lisse et non diffractante [Ross 1976] :

$$\frac{h_v \cdot \sin(\theta_i)}{\lambda} < \frac{1}{4} \quad (1.51)$$

avec h_v la hauteur moyenne des vagues, θ_i l'angle d'incidence de l'onde acoustique sur l'interface eau-air et λ la plus petite longueur d'onde de travail. D'après la géométrie de l'étude 1.4.2.1, lorsqu'un point source du navire est au plus proche du capteur central de l'antenne, l'angle d'incidence des ondes acoustiques sur la surface est $\theta_i = 12,79^\circ$. Ainsi, pour pouvoir valider l'hypothèse d'une interface air-eau lisse et non diffractante, il faut que la hauteur des vagues vérifie l'inégalité, pour une fréquence maximale de travail de 2000 Hz :

$$h_v < \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{\sin(12,79^\circ)} \approx 0,85m \quad (1.52)$$

Dans la campagne de mesures de bruit de navire de surface au passage qui sera présentée dans le chapitre 3, l'état de surface du lac était tel que les vagues de surface avaient une hauteur de quelques dizaines de centimètres. L'inégalité (1.52) était donc largement vérifiée. Nous pouvons donc faire l'hypothèse dans cette thèse d'une interface air-eau lisse, l'unique interaction possible des ondes acoustiques avec la surface est donc une réflexion parfaite modélisable par la méthode des sources images.

1.4.2.4 Implémentation du simulateur de propagation

L'implémentation du modèle analytique simplifié de propagation acoustique en présence d'une source ponctuelle mobile est ici validée à partir de mesures dans l'espace temps-fréquence.

La configuration de simulation consiste en une source monopolaire ponctuelle de vitesse $v = 20m.s^{-1}$, de fréquence pure $f_s = 3000Hz$ et de trajectoire en coordonnées cartésiennes $S_n(-50 + v.\tau; 2,50; -10)$ en mètres. Le spectrogramme du signal reçu par un point de mesure de coordonnées cartésiennes $A_m(0;0;0)$ est représenté sur la figure 1.31. Selon la théorie des rayons, la loi d'évolution temporelle de la fréquence instantanée $f(t)$ d'une onde acoustique reçue par un capteur A_m et émise par une source en un point $S_n(\tau)$ s'exprime analytiquement par :

$$\begin{aligned} f(t) &= f_s \left(1 + \frac{d \frac{\|S_n(\tau)A_m(t)\|}{c}}{dt} \right) \\ &= f_s \left(1 - \overrightarrow{Ma} \cdot \frac{\overrightarrow{S_n(\tau)A_m(t)}}{\|S_n(\tau)A_m(t)\|} \right) \end{aligned} \quad (1.53)$$

Le calcul analytique de la fréquence instantanée du signal reçu au capteur A_m est représenté en rouge sur le spectrogramme de la figure 1.31. D'après la figure 1.31, la modulation de la

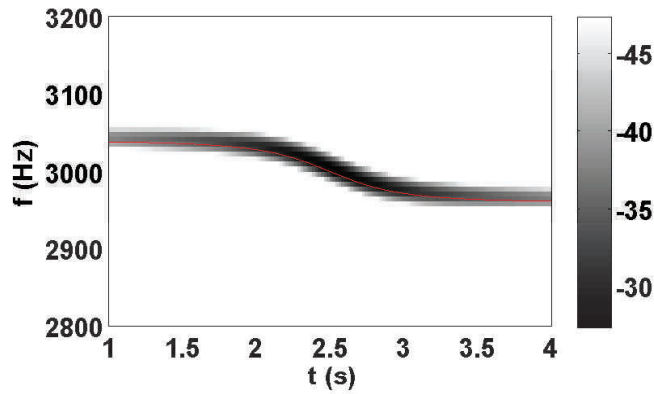


FIGURE 1.31 – Spectrogramme du signal acoustique reçu au point A_m et émis par une source sinusoïdale de fréquence $3000Hz$ en un point $S_n(\tau)$ et de vitesse $v = 20m.s^{-1}$. En rouge, loi théorique de la fréquence instantanée $f(t)$ calculée par l'expression (1.53).

fréquence reçue au niveau du capteur A_m pour la simulation de cette source en mouvement rectiligne uniforme est égale à la loi analytique de fréquence instantanée donnée par l'équation (1.53). Cela valide la simulation réalisée de la propagation des ondes acoustiques émises par une source mobile à partir de la théorie des rayons.

1.5 Proposition et simulation d'une configuration expérimentale réaliste

La section précédente a introduit plusieurs modèles analytiques de sources : le modèle d'une source hydroacoustique modélisant le propulseur et le modèle d'une source vibroacoustique modélisant la coque d'un navire de surface. La propagation des ondes acoustiques a également été modélisée analytiquement en tenant compte du mouvement de sources acoustiques ponctuelles. Un simulateur simplifié du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface en mouvement a donc été construit avec ces modèles analytiques.

L'objectif de cette section est de simuler le rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface à l'aide des deux modèles de sources et de montrer que le champ de pression acoustique simulé est réaliste et suffisant pour notre étude.

La géométrie du problème est la même que celle décrite dans le paragraphe 1.4.2.1, le navire est ici remplacé par une plaque vibrante de 20 mètres de longueur, 2 mètres de largeur et 2,5 centimètres d'épaisseur et une source ponctuelle de bruit de bord d'attaque de pale. La plaque est parallèle au plan (xOy). La source de bruit de bord d'attaque est une source dipolaire dont le champ de pression rayonnée $p(A_m, t)$ est calculé en utilisant l'expression (1.48) et en utilisant la norme des fluctuations de portance $\|\vec{F}_p\|(S_n, t)$ donnée par l'équation (1.12). Pour rendre compte de la directivité réelle d'un propulseur qui est dipolaire selon l'axe z de la figure 1.32 [Goldstein 1976], la source dipolaire de bord d'attaque de pale est orienté selon l'axe z.

La figure 1.32 représente cette géométrie.

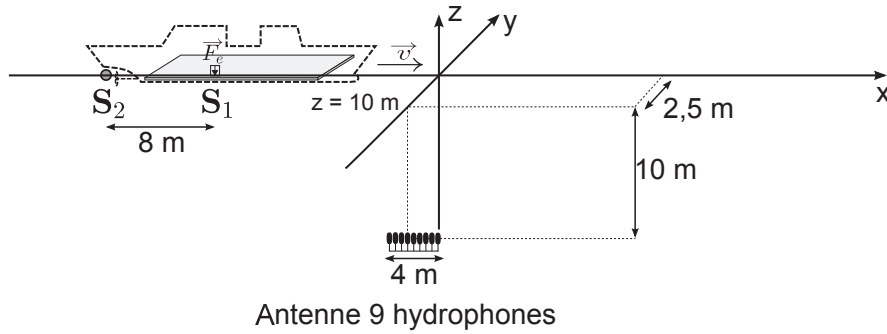


FIGURE 1.32 – Schéma de la géométrie de la configuration réaliste simulée. Les géométries du schéma ne sont pas représentées à l'échelle de la simulation réalisée.

La plaque vibrante est excitée par une force, au point de coordonnées cartésiennes en mètres $(-3; -0,60; 0)$ par rapport à son centre. Le spectre de la force est composé de trois fréquences pures : 1200 Hz, 1400 Hz et 1800 Hz. Le champ de pression acoustique rayonné par la plaque vibrante est exprimé en utilisant le modèle de propagation décrit dans la section 1.4 et en considérant $N = 4221$ sources ponctuelles monopolaires dont les amplitudes

sont calculées par les équations (1.2) et (1.24). La source de bord d'attaque présente un gabarit spectral en forme de bosse de bruit (fig. 1.5) qui est maximale à la fréquence 900 Hz, de pente croissante +10dB par décade et de pente décroissante -25dB par décade.

Le milieu de propagation simulé est un milieu marin de célérité $c = 1500m.s^{-1}$ et il est considéré avec uniquement une interaction avec la surface. La trajectoire d'une grille de calcul, *i.e.* ensemble de points, qui est centrée sur l'ensemble des sources est $(-2 + v.t; 2, 50; +10)$. On considère une vitesse de sources de $v = 2m.s^{-1}$ et une durée d'acquisition de 2 secondes. Dans le référentiel mobile de cette grille de calcul, la source du propulseur a pour coordonnées $S_2(-6m; 0m; 0m)$ et la plaque vibrante est mise en mouvement telle que son point d'excitation ait pour coordonnées $S_1(2m; 0m; 0m)$.

Les valeurs des paramètres du modèle de propulseur définis dans la sous-section 1.3.2 sont les suivantes :

- Corde : $C = 6m$
- Taux de turbulence : $T_u = 5\%$
- Longueur de cohérence longitudinale : $\Lambda = 0,4cm$
- Vitesse d'écoulement : $V_{flow} = 40m.s^{-1}$

L'expérience de mesure de bruit de passage d'une maquette de navire de surface à l'échelle 1/5 sera présentée dans le chapitre 3 et, pour cette expérimentation, les fréquences de travail ont été multipliées par 10 par rapport à un cas à taille réelle. Ces paramètres ne correspondent donc pas à un propulseur physique car ils ont été choisis pour que le champ de pression rayonnée soit contenu dans la bande fréquentielle de travail [500Hz; 2000Hz].

Les valeurs paramètres du modèle de coque définis dans la sous-section 1.3.3 sont les suivantes :

- Module d'Young $E = 2.10^{11}(1 + j\eta^2)Pa$ avec un amortissement structural $\eta = 3\%$,
- Coefficient de Poisson $\nu = 0,3$
- Masse volumique $\rho_{pla} = 7800kg.m^{-3}$

La surface de la plaque est discrétisée en un maillage régulier de points espacés selon x et selon y avec un pas de 10 centimètres.

L'autospectre moyen de pression acoustique simulée au niveau de l'hydrophone central de l'antenne est représenté sur la figure 1.33. En comparant cet autospectre simulé avec les ordres de grandeurs de chaque source identifiés dans le paragraphe 1.2.4, on en déduit que le simulateur bien que simple permet de simuler une signature de navire de surface suffisamment réaliste pour notre étude. En effet, comme il l'a été observé, le bruit rayonné par le propulseur simulé possède une décroissance de -25dB par décade ce qui correspond à l'ordre de grandeur donné par la figure 1.11b. Les fréquences d'excitation de la plaque vibrante peuvent être choisies égales à des fréquences réelles de sources internes typiques de navire de surface, elles sont ici choisies de telle sorte à être positionnées sur la pente décroissante de la bosse de bruit de la source de propulseur. La contribution relative entre la source de propulseur et de la source de coque est choisie conformément à l'ordre de grandeur observé sur la figure 1.12.

De plus, contrairement aux modèles paramétriques cités dans le paragraphe 1.2.4, ce

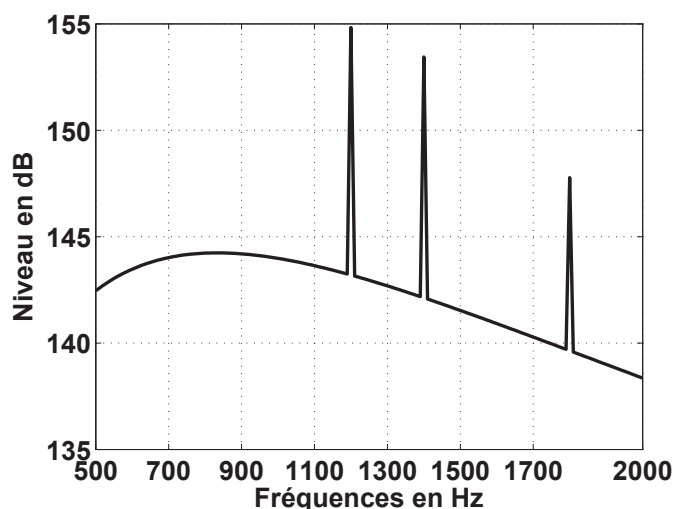


FIGURE 1.33 – Configuration expérimentale réaliste : Autospectre moyen de la pression acoustique simulée au niveau de l'hydrophone central de l'antenne.

simulateur permet de simuler des propriétés spatiales de sources réalistes. En effet, le bruit des sources internes simulé est une réponse vibroacoustique de plaque, tous les points de la plaque contribuent donc de façon cohérente au bruit rayonné par la plaque. La directivité du propulseur considérée comme dipolaire d'après Goldstein [Goldstein 1976] est réaliste.

1.6 Conclusions

Pour concevoir un simulateur réaliste du rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface, une étude bibliographique sur les sources acoustiques composant la signature acoustique d'un navire de surface a été réalisée, afin de lister tous les phénomènes physiques existant au niveau d'un navire de surface et produisant un rayonnement acoustique. L'analyse de données expérimentales de signatures acoustiques de navires de surface de la littérature a permis d'identifier les principales sources acoustiques et leur contribution énergétique relative dans la signature d'un navire de surface. Cette analyse bibliographique a justifié le choix des modèles de sources simulés.

Un outil de simulation a été conçu en utilisant des modélisations analytiques avec des hypothèses simplificatrices, pour simuler le rayonnement acoustique sous-marin d'un navire de surface en mouvement. Une source hydroacoustique de bord d'attaque de pale a été choisie pour modéliser le rayonnement acoustique d'un propulseur de navire de surface de façon réaliste et simple et le rayonnement acoustique d'une plaque vibrante a été choisi pour simuler le rayonnement acoustique de la coque d'un navire de surface. Ces modèles de source ont été validés par des données de la littérature. De plus, la propagation acoustique sous-marine, dans un milieu où l'influence du fond peut être négligée, a été modélisée

simplement pour des sources en mouvement, par la théorie des rayons, et sa validité a été justifiée par la littérature. Bien que ce simulateur soit approché, le rayonnement acoustique simulé par ces modèles de sources et ce modèle de propagation permet de simuler un autospectre de signature acoustique de navire de surface réaliste [Oudompheng 2013]. En effet, la section 1.5 montre que le simulateur fournit une représentation moyenne d'une signature acoustique de navire de surface.

Intérêt du simulateur

Les mesures de bruit de passage de navire de surface en eau par antenne hydrophonique étant une procédure coûteuse, ce simulateur a pour objectif d'évaluer les performances des méthodes de localisation de sources du chapitre 2 sur des sources typiques d'un navire de surface. Ce simulateur permet également le dimensionnement d'une configuration expérimentale de mesure de bruit de passage qui sera présentée dans le chapitre 3.

Perspectives en simulation

Même s'il est suffisant pour nos objectifs, le simulateur actuel est encore rudimentaire. Il serait intéressant d'affiner le modèle de propulseur en simulant un mouvement de rotation des sources de bord d'attaque positionnées au niveau de chaque bord d'attaque de pale pour obtenir une directivité plus réaliste de ce type de sources. Le modèle de carène qui n'est pas représentatif d'une réponse vibratoire réelle peut également être affiné. Enfin, il peut être utile d'enrichir le simulateur actuel avec des sources prédominantes réalistes telles que la cavitation du propulseur, le sillage du navire et la vague d'étrave pour obtenir une signature acoustique de navire de surface plus complète.

Méthodes d'imagerie acoustique de navire de surface au passage

Sommaire

2.1	Introduction	56
2.2	État de l'art	57
2.2.1	Méthodes de localisation et de contribution de sources acoustiques	59
2.2.1.1	Méthodes de localisation et de contribution de sources fixes	59
2.2.1.2	Méthodes de localisation et de contribution pour sources mobiles	64
2.2.2	Méthodes d'optimisation de géométrie d'antenne	66
2.2.3	Choix du système d'imagerie acoustique de navire de surface au passage	67
2.3	Méthode initiale : Formation de voies pour sources mobiles et déconvolution	70
2.3.1	Formation de voies pour sources mobiles	70
2.3.1.1	Hypothèse d'effet Doppler négligeable	70
2.3.1.2	Estimateur de la formation de voies pour sources mobiles	71
2.3.1.3	Valeurs théoriques du Beamforming-MS par bloc et lien avec les sources recherchées	73
2.3.2	Performances de la formation de voies pour sources mobiles	77
2.3.2.1	Réponse d'antenne moyenne et erreurs de modèle	80
2.3.2.2	Beamforming-MS et erreurs de modèle	86
2.3.2.3	Effets de bords induits par une grande grille de calcul	89
2.3.2.4	Résolution limitée en basses fréquences	90
2.3.3	Déconvolution de la formation de voies pour sources mobiles	91
2.3.3.1	Problème inverse de déconvolution et estimation énergétique des sources	91
2.3.3.2	Déconvolution par une méthode itérative, non-négative et aux moindres carrés	93
2.3.4	Performances des méthodes de déconvolution de la formation de voies pour sources mobiles	99
2.3.4.1	Erreur due à la non-vérification de l'hypothèse de déplacement de sources négligeable	99
2.3.4.2	Performances pour deux sources incohérentes et du bruit de mesure	101
2.3.5	Étude d'une configuration réaliste : Validation du choix de la méthode initiale pour cette étude	105
2.3.6	Conclusions	107

2.4	Améliorations de la localisation et de la contribution de sources mobiles . . .	108
2.4.1	Propositions d'améliorations de la méthode initiale	108
2.4.2	Pondération du Beamforming-MS	109
2.4.3	Antenne à ouverture synthétique	113
2.4.3.1	Méthode passive de synthèse d'ouverture	114
2.4.3.2	Validations numériques	117
2.4.3.3	Conclusions et perspectives	122
2.4.4	Correction de trajectographie par analyse des résultats de formation de voies	122
2.4.4.1	Principe de l'algorithme de correction	123
2.4.4.2	Validations numériques et performances	125
2.4.4.3	Conclusions	128
2.5	Conclusions	128

2.1 Introduction

Dans le domaine du bruit de passage de véhicule, les normes sur les niveaux de pression acoustique rayonnée lors du passage d'un véhicule concernent uniquement des mesures acoustiques mono-capteur [ISO 2007, ISO 2012]. Ces méthodes ne renseignent pas sur la localisation des différentes sources acoustiques et leur contribution relative à la signature acoustique du véhicule. La cartographie acoustique, appelée *imagerie acoustique*, du véhicule par traitement d'antenne permet d'apporter ces informations manquantes qui sont utiles pour le diagnostic en vue d'une réduction de bruit rayonné, comme l'illustre la figure 2.1. Mes travaux de thèse visent à développer des méthodes robustes d'imagerie acoustique pour l'étude des sources stationnaires d'un navire de surface au passage. En effet, les conditions d'expérimentation en environnement marin sont plus difficiles à maîtriser qu'en environnement aérien. Il est donc nécessaire de développer des méthodes robustes aux variations des paramètres du milieu.

Un système d'imagerie acoustique est un ensemble indissociable composé d'une antenne de mesures et de méthodes de localisation de sources et de contribution de sources. La géométrie de l'antenne conditionne les performances des méthodes. La **localisation de sources** désigne l'estimation de la répartition spatiale des différentes sources acoustiques générées par le véhicule. La **contribution de sources** désigne l'estimation de la contribution de pression acoustique de chaque zone source au sein de la signature acoustique globale du véhicule. Cette estimation est réalisée par intégration spatiale.

Les travaux de cette thèse sont donc réalisés dans le cadre d'une configuration expérimentale d'une antenne de mesure linéaire, fixe avec un nombre réduit d'hydrophones, ici au nombre de neuf par rapport à la campagne de mesures qui a été réalisée dans cette thèse et dont la configuration est présentée dans le paragraphe 1.4.2.1. Le faible nombre d'hydro-

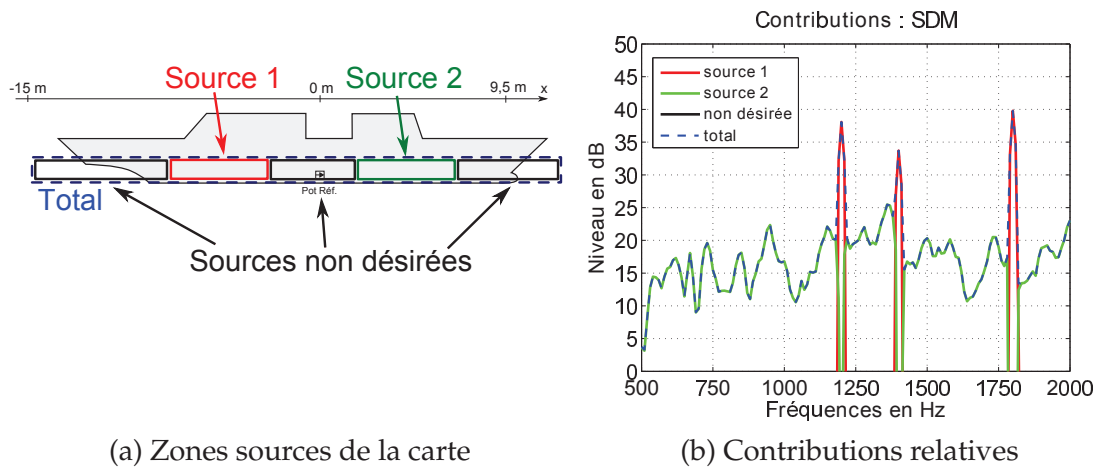


FIGURE 2.1 – Définition de zones sources (en couleur) dans la carte acoustique du navire au passage (a) et identification de la contribution relative par SDM de chaque source (b). Application aux mesures au lac de Castillon présentées dans la partie 3.

phones et le mouvement relatif entre le véhicule et l'antenne vont contraindre les méthodes de localisation de sources et de contribution de sources.

Dans ce manuscrit, un état de l'art des méthodes de localisation de sources et de contribution de sources est d'abord dressé dans la section 2.2 afin de déterminer le choix du système d'imagerie acoustique. La méthode d'imagerie acoustique choisie pour cette étude du bruit de passage est ensuite présentée dans la section 2.3 et les performances de cette méthode sont analysées afin d'en connaître les limitations. Au cours de ma thèse plusieurs améliorations de cette méthode initiale ont été proposées et sont présentées dans la section 2.4 afin d'améliorer les performances en termes de localisation et de contribution. Enfin, la section 2.5 tire des conclusions et donnent des perspectives de recherche futures.

Pour illustrer les différentes études de ce chapitre, le simulateur présenté dans le chapitre 1 est utilisé pour générer des configurations de test.

2.2 État de l'art

Dans cette thèse, il y a donc plusieurs enjeux pour le développement de systèmes d'imagerie acoustique :

- un enjeu industriel pour proposer un matériel de mesure acoustique en accord avec les moyens financiers d'industriels navals qui auraient recours à ce type de diagnostic, la solution la plus évidente est alors la réduction du nombre de capteurs, en accord avec une facile mise en œuvre de l'antenne sur les polygones de mesure existants,
- des enjeux scientifiques pour concevoir des méthodes de localisation de sources et de contribution de sources adaptées aux antennes réduites et maîtriser leurs perfor-

mances.

Cette section a pour objectif de choisir le système d'imagerie acoustique le plus adapté pour traiter la problématique de la thèse. Ce choix est motivé par une analyse de l'état de l'art des méthodes existantes dans la littérature et des contraintes définies en introduction. Cette revue bibliographique est organisée en deux parties : une synthèse de l'état de l'art sur les méthodes de localisation de sources et de contribution de sources et une synthèse des méthodes d'optimisation de géométrie d'antennes.

Comme présenté dans le paragraphe 1.4.2.1, l'antenne considérée dans cette étude est linéaire selon x . Les méthodes d'imagerie acoustique seront donc ici appliquées pour estimer la localisation et la contribution des sources uniquement selon l'axe x . En utilisant la connaissance *a priori* du modèle de propagation des ondes acoustiques, les méthodes d'imagerie acoustique ont pour but d'estimer les paramètres des sources tels que leur localisation et leur contribution à partir des signaux mesurés par l'antenne. Ce problème inverse est représenté schématiquement par la figure 2.2, il est défini entre les pressions mesurées par l'antenne et les pressions acoustiques des sources rayonnées à un mètre comme défini dans le paragraphe 1.3.1.2.

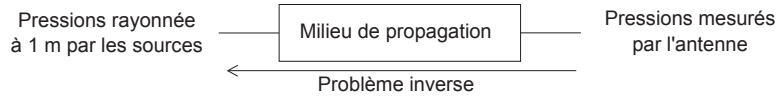


FIGURE 2.2 – Schéma représentant les signaux des sources comme la solution d'un problème inverse.

Le signal temporel de pression acoustique mesuré par le capteur A_m à l'instant t est noté $\check{p}(A_m, t)$ et le vecteur concaténant les différentes mesures des capteurs à l'instant t est noté $\check{\mathbf{p}}_a(\mathbf{a}; t) = [\check{p}_a(A_1, t), \dots, \check{p}_a(A_M, t)]^T$. L'accent $\check{}$ signifie que la grandeur accentuée est exprimée dans le domaine temporel. La transformée de Fourier de la pression acoustique mesuré par le capteur A_m à la fréquence f est noté $p_a(A_m, f)$ et le vecteur concaténant tous les spectres des capteurs à la fréquence f est noté $\mathbf{p}_a(\mathbf{a}; f) = [p_a(A_1, f), \dots, p_a(A_M, f)]^T$.

Le problème d'estimation étant aveugle, les méthodes d'imagerie acoustique considèrent un ensemble x de L points de calcul, $X_l, l \in [1, L]$, sur lesquels sont estimées les sources. L'ensemble de ces points de calcul réparti sur une ligne de calcul est appelé **grille de calcul**. Les points de calculs sont considérés comme les positions de sources équivalentes qui rayonnent le même champ de pression acoustique que la distribution de sources réelles. La source équivalente au point X_l est caractérisée par sa pression rayonnée à un mètre notée $\hat{p}_x(X_l, f)$ à la fréquence f et le vecteur concaténant toutes les pressions de sources équivalentes à la fréquence f est noté $\hat{\mathbf{p}}_x(\mathbf{x}; f) = [\hat{p}_x(X_1, f), \dots, \hat{p}_x(X_L, f)]^T$. Dans la présente étude, les sources acoustiques sont recherchées sur un navire, la grille de calcul est donc choisie de telle sorte qu'elle englobe toute la longueur du navire.

2.2.1 Méthodes de localisation et de contribution de sources acoustiques

Cette revue bibliographique concernent les sources acoustiques stationnaires et est organisée en deux parties : un état de l'art sur les méthodes de localisation et de contribution de sources fixes et un état de l'art sur les méthodes de localisation et de contribution de sources mobiles.

2.2.1.1 Méthodes de localisation et de contribution de sources fixes

Afin de résumer la revue bibliographique sur les méthodes pour sources fixes, une classification des méthodes a été proposée en trois classes : les méthodes globales, les méthodes de scrutation par point et les méthodes de sous-espaces. Toutes ces méthodes ne permettent pas de traiter le cas de sources mobiles mais leur présentation est utile car elle permet de synthétiser les principales stratégies de résolution du problème d'identification de sources acoustiques en trois classes distinctes.

On peut noter que les méthodes pour sources fixes et stationnaires tirent profit de la stationnarité des sources pour employer des quantités moyennes temporelles. L'estimation de l'autospectre moyen d'un signal source stationnaire est alors possible à partir de moyennes temporelles. De plus, le bruit de mesure est généralement considéré comme blanc, un grand nombre de moyennes temporelles permet ainsi une bonne estimation de l'autospectre moyen du bruit de mesure et par conséquent permet de s'affranchir de ses variations qui peuvent perturber les résultats.

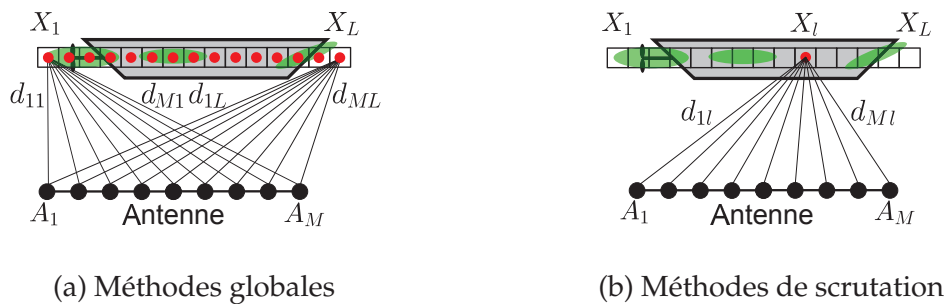


FIGURE 2.3 – Schéma des solutions recherchées par les méthodes de scrutation et les méthodes globales. Les points rouges schématisent les points de calcul où s'effectue l'estimation des sources inconnues.

Méthodes globales

Les méthodes globales consistent à résoudre le problème inverse acoustique en considérant simultanément tous les points de calcul \mathbf{x} , la figure 2.3a illustre ce principe. La solution

recherchée par les méthodes globales est la suivante :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{p}}_x(\mathbf{x}; f) = \arg \min_{\mathbf{p}_x(\mathbf{x}; f)} \|\mathbf{p}_a(\mathbf{a}; f) - \mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{x}; f) \mathbf{p}_x(\mathbf{x}; f)\|_2^2 + \lambda_{\text{reg}}^2 C(\mathbf{p}_x(\mathbf{x}; f)) \\ \text{Contraintes sur } \mathbf{p}_x(\mathbf{x}; f) \end{cases} \quad (2.1)$$

avec λ_{reg}^2 un paramètre qui permet la régularisation de la solution inverse en satisfaisant l'équilibre entre le terme de fidélité aux pressions mesurées et la pénalisation $C(\cdot)$ sur la solution recherchée. $\mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{x}; f)$ est la matrice de transfert dont les colonnes sont égales aux vecteurs $\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)$, $l \in [1, L]$. $\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)$ est la fonction de Green entre le point X_l de la grille de calcul et les points de mesure de l'antenne \mathbf{a} à la fréquence f en fonction du modèle de propagation choisi. Cette fonction de Green à la fréquence f est également appelée *fonction de transfert*.

La principale limite des méthodes globales est le nombre de points de calcul L qui est généralement bien plus grand que le nombre de capteurs, cela implique que le problème inverse est mal posé au sens d'Hadamard puisque la solution n'est pas unique [Hadamard 1902], des contraintes doivent donc être utilisées. Un certain nombre de contraintes sur la solution peuvent être exprimées sous la forme d'une fonction de pénalisation $C(\cdot)$, c'est par exemple le cas des contraintes sur la norme L_p de la solution (norme L_1 [Peillot 2012], norme L_2 [Pereira 2013]). D'autres contraintes ne peuvent être formulées comme un terme de pénalisation et sont alors intégrées dans l'algorithme de résolution. Ce dernier type de contraintes n'est pas encore utilisé en pratique en acoustique du fait de la difficulté de la prédiction de leurs performances, c'est par exemple la contrainte de définition semi-positive [Lange 2010, Yardibi 2010]. Le choix des contraintes doit se faire en assurant la convergence de la solution, la stratégie la plus simple est d'assurer l'existence d'un optimum local en choisissant des contraintes convexes [Boyd 2004, Grant 2004]. Des approches bayésiennes ont également été proposées récemment et formulent les contraintes et les variables comme des densités de probabilité, les résultats de ces méthodes statistiques sur la localisation de sources acoustiques sont robustes aux erreurs de modèle et ont des performances maîtrisées [Antoni 2012a].

Par ailleurs, les méthodes globales permettent d'accéder directement à l'information de contribution de pression acoustique de chaque zone source par intégration spatiale de zone de la carte de bruit estimée.

Méthodes de scrutation par point

Les méthodes de scrutation par point consistent à résoudre indépendamment le problème inverse en chaque point de calcul. On considère alors que scanner une grille de calcul point à point permet d'estimer la distribution des sources sur ce plan, la figure 2.3b illustre ce principe. La solution recherchée par les méthodes de scrutation par point est la suivante :

$$\hat{p}_x(X_l, f) = \arg \min_{p_x(X_l, f)} \|\mathbf{p}_a(\mathbf{a}; f) - \mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f) p_x(X_l, f)\|_2^2 \quad (2.2)$$

avec $\mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f)$ un vecteur de projection. Le point de calcul X_l est appelé *point focalisé* pour cette catégorie de méthodes. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles considèrent

chaque point de calcul séquentiellement, ce qui mathématiquement suppose que les pressions mesurées résultent d'une seule source équivalente au point focalisé.

Deux principales méthodes de scrutation sont couramment utilisées dans la littérature et ont subi de nombreuses améliorations au cours des dernières années. Ce sont les méthodes de formation de voies et les méthodes de Capon.

Méthode de formation de voies

La première méthode de scrutation est la méthode de formation de voies qui consiste à résoudre le problème de l'équation (2.2) aux moindres carrés :

$$\hat{p}_x(X_l, f) = \frac{\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)^H}{\|\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)\|_2^2} \mathbf{p}_a(\mathbf{a}; f) \quad (2.3)$$

Le vecteur de projection de la formation de voies est donc :

$$\mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f) = \frac{\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)^H}{\|\mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)\|_2^2} \quad (2.4)$$

La méthode de formation de voies est la méthode la plus classique en traitement d'antenne [Van Veen 1988, Collins 1994, Krim 1996], elle est connue pour sa robustesse aux perturbations telles que le bruit de mesure mais possède de nombreux lobes d'estimation qui limitent la dynamique de localisation, ce qui est problématique dans le cas multi-sources. En effet, les antennes acoustiques sont des réseaux discrets de capteurs, cela implique que le résultat de formation de voies est le résultat de la convolution des amplitudes de pression de sources équivalentes $\hat{p}(X_l; f)$ avec la réponse d'antenne. Pour cela, elle a connu de nombreuses améliorations au fil des ans notamment des étapes de pré-filtrage, de pondération des pressions mesurées [Van Veen 1988].

Pour accéder à la contribution des sources dans la signature acoustique de l'objet cartographié par formation de voies, des méthodes de déconvolution de la réponse d'antenne dans les résultats de formation de voies ont été proposées. Le problème de déconvolution de formation de voies peut se formuler comme une méthode globale (éq. (2.1)), tous les points de calcul $X_l, \forall l \in [1, L]$ sont ainsi pris en compte simultanément dans l'estimation des amplitudes de sources inconnues. Les méthodes de déconvolution de la formation de voies pour sources fixes sont ici résumées succinctement selon les contraintes qu'elles intègrent, c'est-à-dire selon le degré d'hypothèses qu'elles utilisent :

- Sources incohérentes : Pour l'hypothèse de sources incohérentes, des méthodes itératives CLEAN [Hogbom 1974] et ses extensions [Wang 2004a], RELAX [Li 1996], DAMAS [Brooks 2006a], SDM [Bruhl 2005], SEM [B. 2003], ont été développées pour ne pas avoir recours à l'inversion d'un problème de trop grande dimension et très mal posé. Les méthodes de type CLEAN et RELAX nécessitent une connaissance a priori du nombre de sources. La méthode SDM qui repose sur une descente de gradient et la méthode SEM qui repose sur une méthode de gradient conjugué nécessitent un paramétrage de la vitesse de descente. Toutes ces méthodes ont un nombre d'itérations maximal à fixer et un critère d'arrêt sur l'énergie reconstruite est traditionnellement utilisé. Ce critère d'arrêt empirique arrête l'algorithme lorsque l'énergie reconstruite ne varie pas plus que la valeur d'un seuil correspondant à l'énergie du bruit.

- Sources cohérentes : Plusieurs méthodes de déconvolution ont été proposées pour traiter le problème de sources cohérentes, ce sont des méthodes itératives telles que LORE [Ravetta 2005], DAMAS-C [Brooks 2006b], CMF [Yardibi 2008, Yardibi 2010] et CLEAN-SC [Sijtsma 2007]. La méthode de Bahr *et al.* [Bahr 2012] estime un champ source inconnu en le décomposant en modes spatiaux cohérents.
- Parcimonie des sources : Des méthodes ont utilisées un *a priori* de parcimonie de la distribution de sources inconnues afin d'améliorer la convergence de l'inversion lorsque la répartition des sources est effectivement parcimonieuse sur la grille de calcul (SC-DAMAS [Yardibi 2008], CMF [Yardibi 2010]).
La méthode CMF (*Covariance Matrix Fitting*) [Yardibi 2010] utilise explicitement un terme de régularisation de pénalisation de l'énergie des sources reconstruites, le bruit de mesure est de ce fait pris en compte. Certaines méthodes de déconvolution, notamment les méthodes itératives telles que SDM [Bruhl 2005] et DAMAS [Brooks 2006a], peuvent prendre en compte un bruit blanc de mesure additif en intégrant un critère d'arrêt de l'algorithme basé sur l'énergie des sources reconstruites.
- Bruit additif : La méthode d'optimisation convexe CMF [Yardibi 2010] estime simultanément les amplitudes de sources inconnues et la variance du bruit de mesure supposé blanc
- Erreurs de modèle : Des méthodes de déconvolution récentes ont corrigé l'erreur commise par des méthodes de déconvolution à faible temps de calcul (DAMAS2, FFT-NNLS) qui font l'hypothèse d'une réponse d'antenne invariante quelle que soit la position du lobe principal sur la grille de calcul [Ehrenfried 2007, Chu 2013]

Méthode de Capon

Une deuxième méthode de scrutation très répandue par ses propriétés de rejet d'interférences, *i.e.* sources localisées hors du domaine d'étude mais mesurées par l'antenne, est la méthode de Capon ou formation de voies adaptative. L'avantage de cette méthode par rapport aux méthodes de formation de voies est que ses vecteurs de projection dépendent des pressions mesurées, la rendant ainsi plus adaptée à chaque mesure. L'estimée $\hat{\Gamma}_x(X_l, f)$ par la méthode de Capon de l'autospectre de la source équivalente inconnue au point X_l s'exprime à partir de l'équation (2.2), en utilisant la valeur du vecteur de projection donnée par l'équation (2.7) :

$$\hat{\Gamma}_x(X_l, f) = \mathbf{w}_{\text{proj}}^H(\mathbf{a}; X_l, f) \mathbf{M}_a(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f) \mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f) \quad (2.5)$$

Le vecteur de projection $\mathbf{w}_{\text{proj}}(X_l; f)$ est déterminé en résolvant le problème d'optimisation suivant [Capon 1969] :

$$\begin{aligned} \forall l \in [1, L], \quad & \ll \text{Minimiser} \quad \mathbf{w}_{\text{proj}}^H(\mathbf{a}; X_l, f) \mathbf{M}_a(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f) \mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f) \\ & \text{tel que} \quad \forall l_i \in [1, L], \quad \mathbf{w}_{\text{proj}}^H(\mathbf{a}; X_{l_i}, f) \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_{l_i}, f) = 1 \gg \end{aligned} \quad (2.6)$$

avec $\mathbf{M}_a(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f) = \mathbb{E}[\mathbf{p}_a(\mathbf{a}; f) \mathbf{p}_a^H(\mathbf{a}; f)]$ la matrice interspectrale estimée des pressions mesurées à la fréquence f . Il vient :

$$\forall l \in [1, L], \mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f) = \frac{\mathbf{M}_a^{-1}(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f) \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)}{\mathbf{g}^H(\mathbf{a}; X_l, f) \mathbf{M}_a^{-1}(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f) \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_l, f)} \quad (2.7)$$

Pour cette méthode, il existe des précautions de régularisation pour l'inversion de la matrice interspectrale des pressions mesurées pour éviter les instabilités numériques, ce sont

les méthodes de chargement de la diagonale [Vincent 2004]. Il a été montré également dans la littérature qu'un bon choix de ce paramètre pouvait améliorer la robustesse aux erreurs de modèle de fonction de Green [Vincent 2004]. De même, la méthode de Capon robuste a été proposée afin de permettre l'existence de faibles erreurs sur la connaissance *a priori* des fonctions de Green, une contrainte elliptique ou sphérique est appliquée aux vecteurs de projection inconnus pour prendre en compte ces erreurs [Stoica 2003, Li 2003]. La méthode de Capon robuste a montré des bonnes propriétés de quantification de sources ponctuelles en environnement aérien. La robustesse de la méthode de Capon a permis son application en environnement difficile tel que l'environnement marin [Gershman 2003, Doisy 2010]. Elle nécessite cependant un grand nombre de moyennes temporelles pour disposer d'une bonne estimation de la matrice interspectrale $\mathbf{M}_a(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f)$ intervenant dans le calcul du vecteur de projection $\mathbf{w}_{\text{proj}}(\mathbf{a}; X_l, f)$.

Méthodes de sous-espaces

Les méthodes de sous-espaces consistent à estimer la localisation des sources en utilisant une décomposition orthogonale de la matrice interspectrale des pressions mesurées $\mathbf{M}_a(f)$. La solution recherchée par les méthodes de sous-espaces est formulée de façon générale comme la solution des méthodes d'ajustement de sous-espaces [Viberg 1991] dont les méthodes de sous-espaces telles que MUSIC sont des cas particuliers :

$$\hat{\mathbf{s}}, \hat{\mathbf{T}} = \arg \min_{\mathbf{o}, \mathbf{T}} \|\mathbf{V}_s - \mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{s}; f) \mathbf{T}\|_2^2 \quad (2.8)$$

avec $\hat{\mathbf{s}}$ les localisations estimées des sources, \hat{N} le nombre *a priori* de ces sources inconnues, \mathbf{T} une matrice de dimension $\hat{N} \times \hat{N}$ et \mathbf{V}_s les vecteurs propres signal intervenant dans la décomposition orthogonale de la matrice interspectrale des pressions mesurées. La matrice interspectrale des pressions mesurées $\mathbf{M}_a(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f)$ étant hermitienne, la décomposition en éléments propres est orthogonale et permet de séparer le bruit de mesure du signal utile :

$$\mathbf{M}_a(\mathbf{a}, \mathbf{a}; f) = [\mathbf{V}_S \quad \mathbf{V}_B] \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}_S & 0 \\ 0 & \mathbf{\Sigma}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_S^H \\ \mathbf{V}_B^H \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

avec \mathbf{V}_S (resp. \mathbf{V}_B) la matrice des vecteurs colonnes signal (resp. bruit) et $\mathbf{\Sigma}_S$ (resp. $\mathbf{\Sigma}_B$) la matrice diagonale des valeurs propres signal (resp. bruit).

L'avantage de ces méthodes est qu'elles utilisent les propriétés d'orthogonalité du sous-espace contenant les informations sur les sources et le sous-espace du bruit de mesure, débarrassant ainsi naturellement les données mesurées. De plus, la séparation des sous-espaces, *i.e.* le nombre \hat{N} de sources *a priori*, est une donnée à fournir qui n'est pas facilement déterminable par une méthode objective (Akaike, AIC, MDL) [Marcos 1998]. En revanche, les méthodes de sous-espaces ne permettent pas d'accéder à l'information de contribution énergétique des sources.

2.2.1.2 Méthodes de localisation et de contribution pour sources mobiles

L'état de l'art des méthodes pour sources mobiles concerne les méthodes permettant d'estimer la localisation des sources mais également l'estimation de leur contribution relative en pression acoustique dans la signature acoustique d'un véhicule en mouvement. En effet, de nombreux travaux existent concernant la localisation de sources mobiles lointaines mais ils sont limités à l'estimation de la position et de la vitesse de ces sources [Hassab 1981, Ludecke 1992], par exemple à des fins d'inversion géo-acoustique [Josso 2010]. Ces méthodes ne permettent pas d'estimer la contribution énergétique des sources à la signature acoustique d'un navire. Elles ne répondent donc pas à la problématique de thèse et ne sont pas recensées ici. Seules les méthodes d'imagerie acoustique de véhicule au passage sont donc présentées dans la suite.

Transport terrestres

Dans le domaine des transports terrestres, l'étude de bruit de passage par antenne acoustique est réalisée essentiellement avec des méthodes temporelles de formation de voies pour sources mobiles qui corrigent l'effet Doppler comme c'est le cas en ferroviaire [Barsikow 1987, Poisson 1996, Bruhl 2000, Mellet 2006, LeCourtois 2012] et en automobile [Kook 2000, Ballesteros 2015].

En automobile, l'utilisation d'antennes acoustiques est expérimentée sur piste d'essai acoustique dans les configurations des mesures normatives actuelles de bruit de passage mono-capteur [ISO 2007]. Dans la littérature, une antenne linéaire dans le sens de la trajectoire du véhicule a été positionnée à 7,5 mètres du passage du véhicule par Kook *et al.* [Kook 2000] et une antenne plane a été positionnée à 5 mètres du passage du véhicule de façon parallèle à la trajectoire par Ballesteros *et al.* [Ballesteros 2015]. Pour ces distances de mesures et pour des vitesses de véhicules automobiles généralement supérieures à 50 km/h, l'effet Doppler doit être pris en compte.

Le domaine ferroviaire a la particularité de ne considérer que peu d'échantillons temporels du fait de la vitesse des sources étudiées qui avoisine 300 km/h [Barsikow 1987, Poisson 1996, LeCourtois 2012] et de la distance de mesure généralement courte employée de 5 à 6,5 mètres. Aucune moyenne temporelle n'est réalisée, la méthode temporelle de formation de voies pour sources mobiles est donc utilisée [Bruhl 2000, LeCourtois 2012] et sa déconvolution est réalisée pour accéder à la contribution énergétique des sources de train. Bruhl propose une méthode de déconvolution, nommée *Source Density Modeling* (SDM), basée sur une descente de gradient [Bruhl 2000] et Le Courtois propose une adaptation de la méthode DAMAS de Brooks *et al.* [Brooks 2006a] au cas des sources mobiles [LeCourtois 2012]. Du fait de l'absence de moyenne temporelle, les résultats de déconvolution sont assez bruités [LeCourtois 2012]. Poisson propose une méthode temps-fréquence utilisant des ondelettes adaptées à la loi de variation de fréquence par effet Doppler [Poisson 1996] mais cette méthode n'est pas adaptée au cas des sources stationnaires.

Transports aériens

Dans le domaine aéronautique, la formation de voies pour sources mobiles est également appliquée pour cartographier un avion au passage [Mueller 2002, Brusniak 2006, Fleury 2011, Sijtsma 2012]. Elle est appliquée en temporel par Sijtsma comme pour les applications de transports terrestres [Sijtsma 2012] et en fréquentiel par Fleury *et al.* [Fleury 2011]. La formulation fréquentielle de la formation de voies pour sources mobiles par Fleury *et al.* est justifiée par les grandes distances de mesures employées. En effet, pour une distance de mesure de 100 mètres et une vitesse de vol d'environ 360 km/h, il est possible de considérer le déplacement des sources négligeable sur des tranches temporelles de courte durée et de calculer une transformée de Fourier des pressions mesurées par l'antenne. La formation de voies pour sources mobiles est ensuite appliquée dans le domaine fréquentiel. Fleury *et al.* estiment la contribution relative des sources localisées par plusieurs méthodes de déconvolution issues du domaine des sources fixes et adaptées pour les sources mobiles : la méthode DAMAS-MS, la méthode DAMAS2-MS, la méthode CLEAN-MS et la méthode CLEANSC-MS avec MS signifiant *Moving Sources* et indiquant leur extension au cas des sources mobiles. Fleury *et al.* montre que la méthode DAMAS-MS surestime moins la signature acoustique de l'avion imagée et qu'elle permet d'avoir une bonne estimation de la contribution énergétique et relative des différentes sources acoustiques. Ces sources acoustiques sont associées à des zones correspondant à des éléments de l'avion [Fleury 2011].

Transports marins

Dans le domaine marin, une seule publication a proposé une méthode qui permet d'estimer la contribution de sources acoustiques dans la signature acoustique d'un navire. Cette méthode est une méthode d'holographie de champ proche pour l'imagerie d'un véhicule marin en mouvement [Hu 2011]. Hu *et al.* montrent que cette méthode permet de quantifier des sources acoustiques sous-marines. Leur méthode est validée avec des sources acoustiques ponctuelles lentement mobiles et une antenne linéaire, en environnement de cuve [Hu 2011]. Cette méthode n'est pas adaptable à l'imagerie d'un navire de surface au passage à échelle réelle. En effet, la méthode de Hu *et al.* possède toutes les contraintes qu'impose l'holographie de champ proche telle que la nécessité d'avoir une distance de mesure de l'ordre de la distance inter-hydrophone et d'avoir un grand nombre d'hydrophones.

Quelques mesures de bruit de passage ont été réalisées à l'aide d'antenne pour la localisation de sources de navires au passage. De Jong *et al.* ont utilisé une antenne linéaire pour localiser les sources hydroacoustiques associées au mouvement d'une maquette de frégate dans un bassin d'essais des carènes [Jong 2009] mais la méthode de traitement d'antenne qu'ils utilisent n'est pas explicitée. De plus, De Jong *et al.* ne présentent que des résultats globaux de localisation de sources sur une large bande [1kHz; 12kHz] et n'estiment pas la contribution des sources. Duncan *et al.* ont proposé une méthode pour localiser les sources d'un engin submersible en utilisant sa propre antenne linéaire tractée, les résultats sont prometteurs mais ne sont que des localisations de sources ponctuelles simulées [Duncan 2011].

2.2.2 Méthodes d'optimisation de géométrie d'antenne

Comme il l'a été évoqué précédemment, un système d'imagerie acoustique comporte une antenne de mesure dont la géométrie conditionne les performances des méthodes de localisation et d'identification de sources. Ainsi, des travaux ont été réalisés pour optimiser la géométrie de l'antenne dans l'objectif d'atteindre les performances des méthodes les meilleures possibles pour un nombre de capteurs donné et une bande passante donnée.

Les méthodes de la littérature optimisent la géométrie d'antenne en fonction des performances de la réponse d'antenne, ses caractéristiques sont représentées sur la figure 2.4. La réponse d'antenne correspond au résultat de la méthode de formation de voies pour l'imagerie d'une source ponctuelle monopolaire d'amplitude unitaire. Les paramètres de la réponse d'antenne sont :

- La résolution qui correspond à la largeur du lobe principal à -3dB de son maximum, elle dépend uniquement de l'envergure de l'antenne et de la fréquence considérée,
- La dynamique qui correspond à la différence en decibels entre l'amplitude du lobe principal et l'amplitude du plus haut lobe secondaire, elle dépend de la densité de capteurs pour une gamme de fréquences donnée,

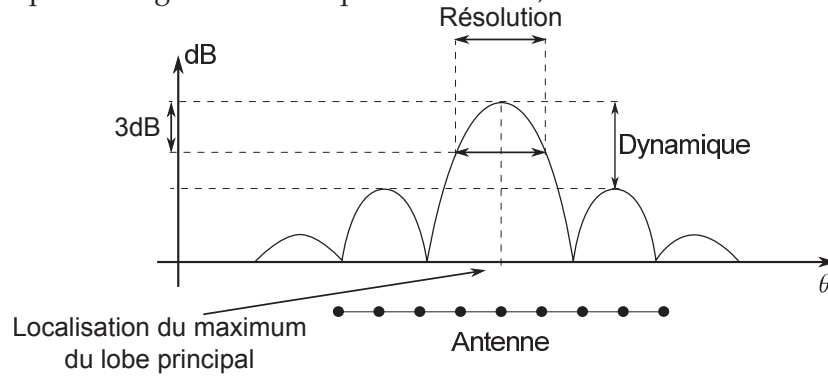


FIGURE 2.4 – Schéma des performances de la réponse d'antenne : dynamique et résolution.

Le decibel acoustique noté dB dans ce qui suit est défini par la formule suivante :

$$dB = 10 \log_{10} \left| \frac{P^2}{P_{ref}^2} \right| \quad (2.10)$$

P^2 étant une valeur de carré de pression acoustique telle qu'une amplitude d'autospectre de source ou un résultat de Beamforming-MS et $P_{ref}^2 = 10^{-12} Pa^2$ est le carré de la pression acoustique de référence en eau.

La réponse d'antenne est directement liée à la directivité de l'antenne qui rend compte de l'aptitude de l'antenne à localiser des sources dans l'espace. En utilisant les termes issus du domaine du traitement d'images, une antenne avec une mauvaise résolution impliquera l'estimation de cartes acoustiques floues et une antenne avec une mauvaise dynamique impliquera une estimation de carte acoustique avec un faible contraste. Pour étudier les performances d'une antenne, la directivité de l'antenne doit être calculée analytiquement mais

cela n'est pas possible pour toutes les géométries. Pour ces raisons, l'optimisation d'antenne se fait au travers de la réponse d'antenne calculée numériquement à partir de la formation de voies pour une source ponctuelle située en face de l'antenne.

Pour les antennes à géométrie quelconque, des méthodes ont été proposées dans la littérature qui utilisent des outils mathématiques comme l'optimisation convexe [Lebret 1997] ou les algorithmes génétiques [LeCourtois 2012]. D'autres méthodes utilisent des espacements inter-capteurs les plus divers possibles comme par exemple des espacements logarithmiques qui assurent une non-proportionnalité de toutes les distances inter-capteurs d'une antenne [Mueller 2002].

Pour les antennes linéaires, le principe d'optimisation appliqué est d'avoir la plus grande variété de distances inter-capteurs, assurant ainsi aux capteurs de l'antenne d'appartenir à des gammes de fréquences les plus différentes possibles. Des géométries non redondantes [Vertatschitsch 1986], à redondance minimale [Moffet 1968] et entrelacées [Smith 1970] ont ainsi été proposées. Cette stratégie permet de réduire la quantité de lobes secondaires et parfois leur niveau puisque ces artefacts sont dus à l'échantillonnage régulier de l'antenne de mesure. Une analogie avec l'échantillonnage temporel régulier et les problèmes que cela implique dans la transformée de Fourier discrète aide à comprendre ce principe.

2.2.3 Choix du système d'imagerie acoustique de navire de surface au passage

La revue bibliographique va permettre de choisir le système d'imagerie acoustique adapté à l'application de bruit de passage de navire de surface.

Choix d'une antenne linéaire régulière

La réponse d'antenne a été simulée pour différentes géométries d'antennes à 9 hydrophones avec un pas intercapteur minimal de 50 centimètres, issues de l'étude bibliographique : une géométrie régulière (Fig. 2.5a), une géométrie entrelacée (Fig. 2.5b), une géométrie non redondante (Fig. 2.6a) et une géométrie à redondance minimale (Fig. 2.6b). Les figures 2.5 et 2.6 représentent les géométries d'antenne ainsi que leur réponse d'antenne dans le plan espace-fréquence $[-20m; +20m] \times [200Hz; 3000Hz]$. Cette réponse d'antenne est associée à une source monopolaire ponctuelle d'amplitude unitaire localisée au point $(x; y; z) = (0m; 2,50m; -10m)$.

Les deux critères caractérisant les performances d'une géométrie d'antenne sont la résolution et la dynamique, ils sont donc tracés pour les quatre géométries d'antenne sur la figure 2.7. Du fait du trop faible nombre de capteurs, l'échantillonnage irrégulier des antennes non redondante et à redondance minimale permet d'avoir une très bonne résolution mais ne permet d'avoir qu'une faible dynamique, 5dB en moyenne. La dynamique est la performance qui importe dans ce choix d'antenne puisque la maquette de navire de surface étudiée est dans un environnement où les sources inconnues sont souvent de niveaux différents. En effet, les perturbations du milieu de propagation diminuent la dynamique, augmentant

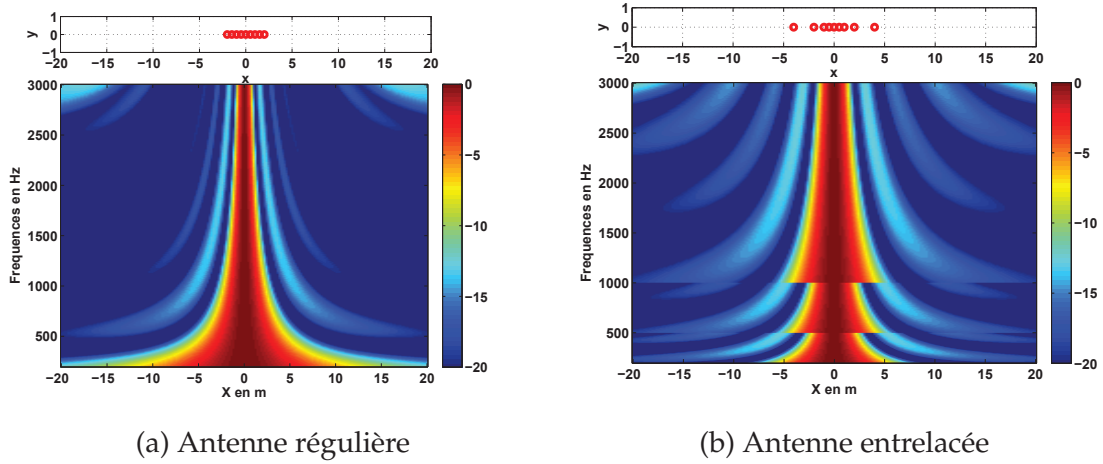


FIGURE 2.5 – Géométrie et réponse d'antenne espace-fréquence d'une antenne régulière et d'une antenne entrelacée.

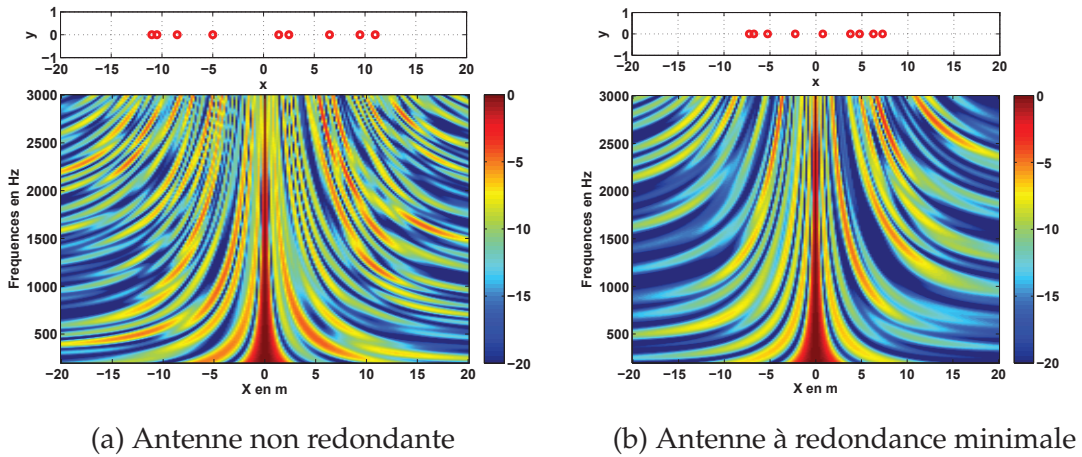


FIGURE 2.6 – Géométrie et réponse d'antenne espace-fréquence d'une antenne non redondante et d'une antenne à redondance minimale.

ainsi la quantité de sources non physiques. La géométrie d'antenne régulière et d'antenne entrelacée permettent d'avoir une dynamique maximale dans la bande fréquentielle visée $[500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$ (fig. 2.7b). Ces deux géométries ont des dynamiques proches à 2dB près. Le choix de l'antenne linéaire régulière a été fait pour sa résolution meilleure que pour l'antenne entrelacée sur la bande fréquentielle d'étude, notamment sur $[1000\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$. D'après la figure 2.7a, la résolution est deux mètres inférieure avec l'antenne régulière sur cette bande.

Choix de la méthode de formation de voies pour sources mobiles et sa déconvolution

Les méthodes de traitements d'antenne utilisées pour les sources stationnaires utilisent

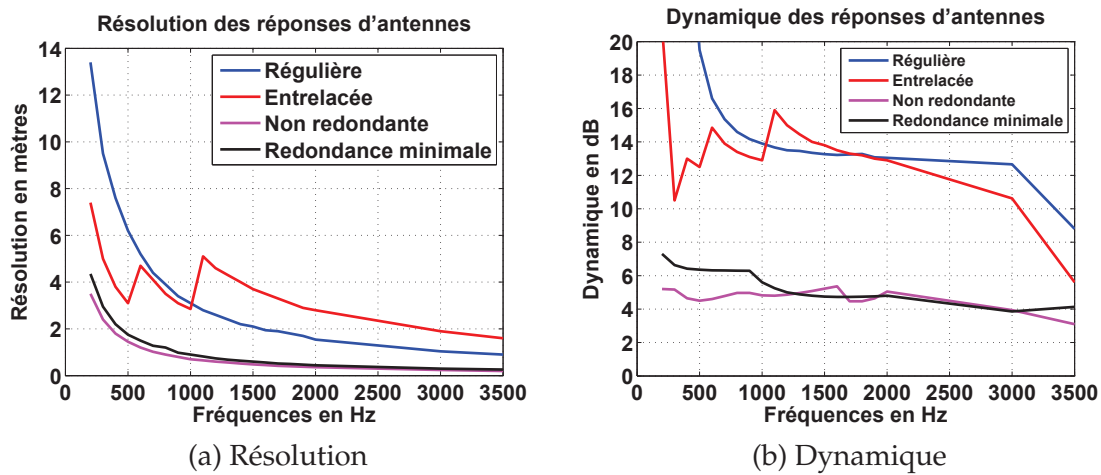


FIGURE 2.7 – Résolutions en mètres et dynamiques en dB de quatre géométries d'antenne : régulière (bleu), entrelacée (rouge), non redondante (magenta) et à redondance minimale (noir).

généralement une estimée de la matrice interspectrale des pressions mesurées. Cette estimée est obtenue en calculant une moyenne statistique sur plusieurs observations. Pour les signaux stationnaires, les observations peuvent être définies par des intervalles temporels avec peu de recouvrement. L'opération de moyenne est limitante dans le cas de sources mobiles pour une raison principale : chaque intervalle temporel est associé à une position des sources, la moyenne temporelle pour estimer la matrice interspectrale impliquerait de sommer de façon cohérente des pressions mesurées relatives à différentes positions de sources rendant ainsi difficile l'estimation des sources. Pour cette raison, les méthodes de traitements d'antenne ayant recours à une estimée de la matrice interspectrale, telles que les méthodes de sous-espaces, les méthodes globales et les méthodes de type Capon, ne sont pas adaptables aux cas de sources mobiles.

Les méthodes de formation de voies sont donc les seules qu'il est possible de choisir ici pour la localisation de sources mobiles. En effet, elles permettent de s'affranchir de l'estimation de la matrice interspectrale des pressions mesurées et permettent de focaliser l'antenne sur les sources en mouvement. Leur déconvolution permettra d'accéder à l'estimation de la contribution relative de chacune des sources localisées à la signature du navire de surface.

De plus, les mesures de bruit de passage sont généralement réalisées dans un contexte maîtrisé avec une configuration expérimentale isolée de toute autre source importante de bruit. Autrement dit, il n'y a donc pas ou peu de sources d'interférence en dehors de la carte acoustique du véhicule qui perturberaient les résultats de formation de voies par des lobes de localisation associés à aucune source physique dans la carte acoustique. Dans ces conditions, les méthodes de déconvolution de la formation de voies permettent l'identification des sources, c'est-à-dire l'estimation de la contribution énergétique de chaque source à la signature acoustique du véhicule. L'expérimentation en lac qui sera présentée dans le chapitre 3 est une configuration favorable pour laquelle il n'y a pas de source d'interférence. En revanche,

ce ne sera pas le cas dans une configuration en mer pour laquelle, il y a généralement une pollution sonore due aux activités anthropiques et à la faune marine. Dans ce dernier cas, la déconvolution de la formation de voies pourra introduire des localisations de sources non physiques.

2.3 Méthode initiale : Formation de voies pour sources mobiles et déconvolution

À partir de l'état de l'art, il a été montré que les méthodes de formation de voies sont bien adaptées à la localisation de sources de véhicule au passage.

L'objectif de cette section est donc d'étudier la stratégie de localisation de sources et de contribution de sources de véhicule au passage actuellement utilisée dans la littérature, à savoir la formation de voies pour sources mobiles et une étape de déconvolution.

Le principe de formation de voies pour sources mobiles est présenté dans la sous-section 2.3.1. Le principe d'une méthode de déconvolution de formation de voies par approche itérative aux moindres carrés est présenté dans la sous-section 2.3.3. Les performances de ces méthodes en présence de perturbations ont été étudiées par divers travaux de la littérature et sont ici analysées pour le cas de l'imagerie d'un navire au passage dans les sous-sections 2.3.2 et 2.3.4.

2.3.1 Formation de voies pour sources mobiles

Dans cette sous-section, le principe de la méthode de formation de voies pour sources mobiles est présenté avec les hypothèses utilisées. Dans cette description, nous explicitons l'estimateur de formation de voies pour sources mobiles et sa valeur théorique sous certaines hypothèses. La formation de voies pour sources mobiles est dénommée dans ce qui suit *Beamforming-MS* où *MS* signifie *Moving Source*.

2.3.1.1 Hypothèse d'effet Doppler négligeable

Pour nos configurations d'intérêt qui ont été évoquées dans le paragraphe 1.4.2.1, les vitesses de navire de $v = 2m.s^{-1}$ à $v = 5m.s^{-1}$ impliquent un faible nombre de Mach, $\|\vec{Ma}\| \leq 3.10^{-3}$. L'annexe B présente une étude sur l'effet du mouvement relatif entre le navire et l'antenne sur les traitements d'antenne. Il est montré que pour une résolution fréquentielle $\Delta f = 10Hz$ et une distance de mesure entre le plan de la trajectoire et l'antenne de 2,50 mètres selon y et de 10 mètres selon z , l'effet Doppler est négligeable sur toute la durée du passage du navire pour des vitesses de $\|\vec{v}\| \leq 4m.s^{-1}$ d'un navire de 20m de long. Pour une vitesse de navire de $\|\vec{v}\| \geq 5m.s^{-1}$ et à hautes fréquences, l'effet Doppler n'est plus négligeable et doit être corrigé.

2.3.1.2 Estimateur de la formation de voies pour sources mobiles

La méthode de formation de voies pour sources mobiles peut se formuler dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. La formulation temporelle est dénommée **Beamforming par instant** et elle est valable quelles que soient la vitesse et la fréquence des sources. Cette formulation permet de faire le lien entre la réponse impulsionnelle présentée dans la section 1.4 et l'expression de la formation de voies. Cette formulation temporelle ne sera cependant pas utilisée dans cette thèse car les vitesses de navire, considérées dans les expérimentations réalisées dans cette thèse, étaient au maximum égales à $5m.s^{-1}$. Un étalement fréquentiel des résultats de localisation pourra donc être constaté mais cela ne perturbera pas l'interprétation des résultats. La formulation fréquentielle est dénommée **Beamforming par bloc** et elle est utilisée pour les cas où l'effet Doppler est négligeable, c'est-à-dire pour toutes les configurations avec un navire de vitesse $v \leq 4m.s^{-1}$ avec la configuration de l'étude donnée par la figure 1.26. Comme évoqué précédemment, cette formulation fréquentielle sera également utilisée pour les configurations avec une vitesse de navire de $5m.s^{-1}$.

L'adaptation de la formation de voies au cas des sources mobiles est réalisée en utilisant une grille de points de calcul $X_l(t)$, $l \in [1, L]$ centrés autour du véhicule à chaque instant, *i.e.* une grille de calcul mobile, permettant d'estimer la localisation des sources dans le référentiel du navire.

Beamforming-MS par instant

Pour les études de bruit de passage avec des vitesses subsoniques de sources, *i.e.* $\|\vec{Ma}\| < 1$, et des distances de mesure quelconques, la formation de voies pour sources mobiles est implémentée par instant.

Pour des raisons de commodités d'écriture, on notera $d_{ml}(t)$ la distance entre un point de mesure A_m et un point focalisé $X_l(t)$, à l'instant t :

$$d_{ml}(t) = \|\overrightarrow{A_m X_l(t)}\| \quad (2.11)$$

et on notera $r_{mn}(t)$ la distance entre un point de mesure A_m et un point source S_n , à l'instant t :

$$r_{mn}(t) = \|\overrightarrow{A_m S_n(t)}\| \quad (2.12)$$

Le résultat de la formation de voies pour sources mobiles en un point X_l est appelé une *pression focalisée*, $p_{BF}(X_l, t)$.

L'expression mathématique du Beamforming-MS par instant s'écrit en fonction de la réponse impulsionnelle pression-pression de l'équation (1.37), pour un point de calcul $X_l(\tau)$

[Hay 1981, Bruhl 2000] :

$$\begin{aligned}
 p_{\text{BF}}(X_l(\tau), \tau) &= \sum_{m=1}^M w_l(\tau) p_a(A_m, t) * g(A_m, t, X_l(\tau), \tau) \\
 &= \sum_{m=1}^M w_l(\tau) p_a(A_m, t) * \frac{\delta\left(t - \tau - \frac{d_{ml}(\tau)}{c}\right)}{4\pi d_{ml}(\tau) \left| 1 - \overrightarrow{Ma} \cdot \frac{\overrightarrow{X_l(\tau)A_m}}{\|X_l(\tau)A_m\|} \right|} \\
 &= \sum_{m=1}^M w_l(\tau) \frac{p_a(A_m, \tau + \frac{d_{ml}(\tau)}{c})}{4\pi d_{ml}(\tau) \left| 1 - \overrightarrow{Ma} \cdot \frac{\overrightarrow{X_l(\tau)A_m}}{\|X_l(\tau)A_m\|} \right|}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

avec le terme de normalisation du Beamforming, d'après les équations (1.37) et (1.42) :

$$\begin{aligned}
 w_l(\tau) &= \left(\sum_{m=1}^M \frac{1}{(A(A_m, t, X_l(\tau), \tau))^2} \right)^{-1} \\
 &= \left(\sum_{m=1}^M \frac{1}{\left(4\pi d_{ml}(\tau) \left| 1 - \overrightarrow{Ma} \cdot \frac{\overrightarrow{X_l(\tau)A_m}}{\|X_l(\tau)A_m\|} \right| \right)^2} \right)^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

La dédopplérisation est réalisée par la dépendance temporelle du terme $d_{ml}(\tau)$ et de la correction d'amplitude $\left| 1 - \overrightarrow{Ma} \cdot \frac{\overrightarrow{X_l(\tau)A_m}}{\|X_l(\tau)A_m\|} \right|$.

Beamforming-MS par bloc

Dans le cas où l'effet Doppler est négligeable sur toute la durée du passage du navire de surface, il est possible de définir des *blocs* temporels de durée T durant lesquels le déplacement des sources peut être considéré comme négligeable. Cette hypothèse se traduit mathématiquement par [Fleury 2011] :

$$v.T \ll \text{distance source/antenne} \tag{2.15}$$

Le *Beamforming-MS par bloc* s'inscrit dans le cadre de ces hypothèses et sa formulation fréquentielle est inspirée de Fleury *et al.* [Fleury 2011] et Carmargo [Camargo 2010]. Il est proposé ici à des fins d'optimisation de temps de calcul. En utilisant l'hypothèse réaliste d'un déplacement de sources négligeable durant un bloc, il est possible d'obtenir un résultat équivalent au Beamforming-MS par instant. Les calculs sont réalisés ici en utilisant les transformées de Fourier des pressions mesurées sur des blocs temporels, la transformée de Fourier de la pression mesurée au capteur A_m sur le k -ième bloc à la fréquence f est :

$$p_a^k(A_m, f) = \mathcal{F}[p_a^k(A_m, t)](f) \tag{2.16}$$

avec \cdot^k l'exposant indiquant un travail sur le k -ième bloc temporel de durée T , $\mathcal{F}[\cdot]$ étant l'opérateur de transformée de Fourier. La durée de ces blocs détermine donc la résolution fréquentielle Δf des traitements d'antenne :

$$\Delta f = \frac{1}{T} \tag{2.17}$$

Le Beamforming-MS par bloc s'exprime mathématiquement au point $X_l(t^k)$ pour le k -ième bloc, avec t^k l'instant central du k -ième bloc de durée T et à la fréquence f , par :

$$p_{\text{BF}}^k(X_l(t^k), f) = w_l^k(t^k) \mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{p}_a^k(\mathbf{a}; f) \quad (2.18)$$

avec $\mathbf{p}_a^k(\mathbf{a}; f) = [p_a^k(A_1, f), \dots, p_a^k(A_M, f)]^T$ le vecteur des pressions mesurées sur l'antenne pour le bloc k et à la fréquence f . Le vecteur $\mathbf{g}^k(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) = [g^k(A_1, X_l(t^k), f), \dots, g^k(A_M, X_l(t^k), f)]^T$ contient les fonctions de transfert entre les capteurs $A_m, m \in [1, M]$ et le point de calcul $X_l(t^k)$ à la fréquence f .

Sous l'hypothèse d'effet Doppler négligeable et d'un déplacement des sources négligeable sur un bloc temporel, la fonction de transfert $g^k(A_m, X_l(t^k), f)$ liant deux points A_m et $X_l(t^k)$ à l'instant t^k s'exprime à la fréquence f par :

$$\forall m \in [1, M], \quad g^k(A_m, X_l(t^k), f) = \frac{\exp(-j2\pi \frac{f}{c} d_{ml}(t^k))}{4\pi d_{ml}(t^k)} \quad (2.19)$$

D'après le terme de normalisation du Beamforming-MS par instant (éq. (2.14)), le terme de normalisation du Beamforming-MS par bloc au k -ième bloc est :

$$w_l^k(t^k) = \frac{1}{\mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{g}^k(\mathbf{a}; X_l(t^k), f)} = \left(\sum_{m=1}^M \frac{1}{(4\pi d_{ml}(t^k))^2} \right)^{-1} \quad (2.20)$$

Le résultat du Beamforming-MS par bloc au point X_l à la fréquence f , qui est étudié pour l'estimation de la localisation des sources, est obtenu en calculant une moyenne quadratique de l'expression (2.18) sur les K blocs :

$$\Gamma_{\text{BF}}(X_l, f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |p_{\text{BF}}^k(X_l(t^k), f)|^2 \quad (2.21)$$

Ce résultat peut s'exprimer matriciellement :

$$\mathbf{\Gamma}_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\mathbf{p}_{\text{BF}}^k(\mathbf{x}(t^k); f)|^2 \quad (2.22)$$

avec $\mathbf{p}_{\text{BF}}^k(\mathbf{x}(t^k); f) = [p_{\text{BF}}^k(X_1(t^k), f), \dots, p_{\text{BF}}^k(X_L(t^k), f)]^T$ le vecteur des résultats du Beamforming-MS par bloc et $\mathbf{\Gamma}_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f) = [\Gamma_{\text{BF}}(X_1, f), \dots, \Gamma_{\text{BF}}(X_L, f)]^T$ le vecteur des carrés des résultats du Beamforming-MS par bloc. La figure 2.8 schématise le principe du Beamforming-MS par bloc.

2.3.1.3 Valeurs théoriques du Beamforming-MS par bloc et lien avec les sources recherchées

Le paragraphe précédent a exprimé mathématiquement les estimateurs de Beamforming-MS par instant et de Beamforming-MS par bloc, nous présentons maintenant la valeur théorique de l'estimateur de Beamforming-MS par bloc lorsque la modélisation

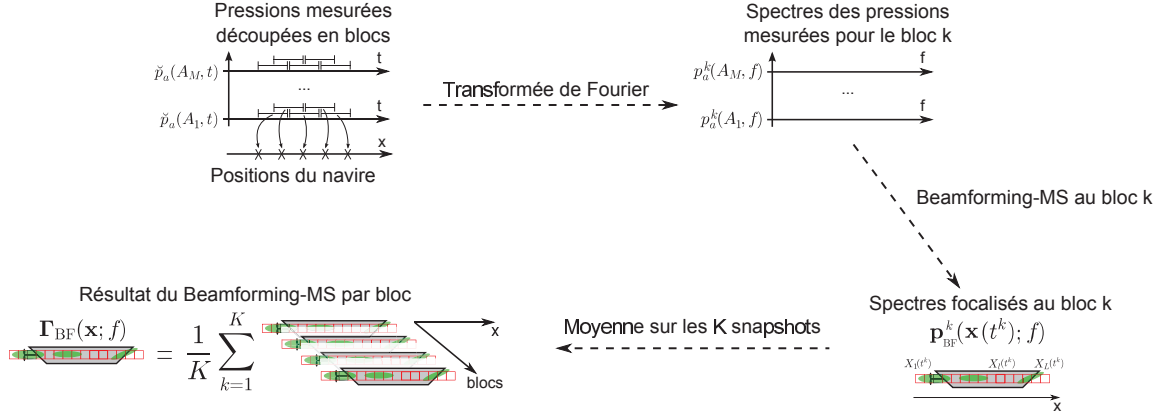


FIGURE 2.8 – Schéma du principe du Beamforming-MS par bloc.

de l'environnement de propagation est parfaite. Cette valeur théorique fera intervenir la réponse d'antenne moyenne et les autospectres des sources recherchées.

On suppose tout d'abord que la distribution source \mathbf{s} est un ensemble discret de N sources ponctuelles monopolaires. De plus, au k -ième bloc temporel et à la fréquence f , l'amplitude du spectre de la source, *i.e.* pression rayonnée à 1 m par la source (voir le paragraphe 1.3.1.2), est notée $p_s^k(S_n(t^k), f)$ au point $S_n(t^k)$. Si la fonction de transfert $g^k(A_m, S_n(t^k), f)$ (éq. (2.19)) décrit effectivement la propagation réelle des ondes acoustiques entre les points $X_l(t^k)$ et A_m alors les pressions acoustiques mesurées par l'antenne \mathbf{a} s'expriment théoriquement par :

$$\mathbf{p}_a^k(\mathbf{a}; f) = \mathbf{G}^k(\mathbf{a}, \mathbf{s}(t^k); f) \mathbf{p}_s^k(\mathbf{s}(t^k); f) + \mathbf{b}^k(\mathbf{a}; f) \quad (2.23)$$

avec $\mathbf{G}^k(\mathbf{a}, \mathbf{s}(t^k); f)$ la matrice de transfert dont l'élément (m, n) est $g^k(A_m, S_n(t^k), f)$, le vecteur des sources $\mathbf{p}_s^k(\mathbf{s}(t^k); f) = [p_s^k(S_1(t^k), f), \dots, p_s^k(S_N(t^k), f)]^T$ et le vecteur du bruit de mesure additif au k -ième bloc temporel $\mathbf{b}^k(\mathbf{a}; f) = [b^k(A_1, f), \dots, b^k(A_M, f)]^T$. Le bruit de mesure $b^k(A_m, f)$ au capteur A_m est supposé blanc, gaussien et indépendant entre chaque capteur.

D'après l'expression de l'estimateur de Beamforming-MS au k -ième bloc donnée par l'équation (2.18), la valeur théorique de l'estimateur de Beamforming-MS par bloc au point X_l est, au k -ième bloc et à la fréquence f :

$$\begin{aligned} p_{\text{BF}}^k(X_l(t^k), f) &= w_l^k(t^k) \mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{p}_a^k(\mathbf{a}; f) \\ &= w_l^k(t^k) \mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) [\mathbf{G}^k(\mathbf{a}, \mathbf{s}(t^k); f) \mathbf{p}_s^k(\mathbf{s}(t^k); f) + \mathbf{b}^k(\mathbf{a}; f)] \\ &= \sum_{n=1}^N w_l^k(t^k) \mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{g}^k(\mathbf{a}; S_n(t^k), f) p_s^k(S_n(t^k), f) \\ &\quad + w_l^k(t^k) \mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{b}^k(\mathbf{a}; f) \\ &= \sum_{n=1}^N p_s f^k(X_l(t^k), S_n(t^k), f) p_s^k(S_n(t^k), f) + w_l(t^k) \mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{b}^k(\mathbf{a}; f) \end{aligned} \quad (2.24)$$

avec $p_s f^k(X_l(t^k), S_n(t^k), f)$ la valeur complexe en $X_l(t^k)$ de la réponse d'antenne centrée en

$S_n(t^k)$ au k-ième bloc à la fréquence f :

$$psf^k(X_l(t^k), S_n(t^k), f) = w_l^k(t^k) \mathbf{g}^{k,H}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{g}^k(\mathbf{a}; S_n(t^k), f) \quad (2.25)$$

Le vecteur $\mathbf{psf}^k(\mathbf{x}(t^k); S_n(t^k), f) = [psf^k(X_1(t^k), S_n(t^k), f), \dots, psf^k(X_L(t^k), S_n(t^k), f)]^T$ contient toutes les valeurs complexes de la réponse d'antenne dont le lobe principal est centré en $S_n(t^k)$, à la fréquence f .

La figure 2.9 schématise l'allure de la valeur en decibels (éq. (2.10)) de la réponse d'antenne $\mathbf{psf}^k(\mathbf{x}(t^k); S_n(t^k), f)$ au k-ième bloc temporel et son évaluation $psf^k(X_l(t^k), S_n(t^k), f)$ au point $X_l(t^k)$.

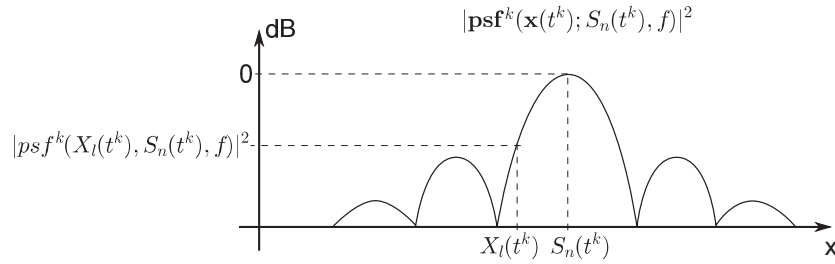


FIGURE 2.9 – Schéma de la valeur en decibels de la réponse d'antenne centrée au point source S_n et son évaluation $psf^k(X_l(t^k), S_n(t^k), f)$ au point $X_l(t^k)$, au k-ième bloc temporel.

C'est le terme de normalisation $w_l^k(t^k)$ qui permet d'assurer que le lobe principal de la réponse d'antenne est d'amplitude unitaire, $psf^k(S_n(t^k), S_n(t^k), f) = 1$ (fig. 2.9).

Pour des commodités de lecture, des notations valables uniquement dans ce paragraphe sont adoptées :

$$\begin{cases} p_{S_n}^k(f) &= p_s^k(S_n(t^k), f) \\ psf_{ln}^k(f) &= psf^k(X_l(t^k), S_n(t^k), f) \\ g_{ml}^k(f) &= g^k(A_m, X_l(t^k), f) \\ b_m^k(f) &= b^k(A_m, f) \end{cases} \quad (2.26)$$

En utilisant l'équation (2.24), la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc de l'équation (2.21) se développe en :

$$\begin{aligned} \Gamma_{BF}(X_l, f) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |p_{BF}^k(X_l(t^k), f)|^2 \\ &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left| \sum_{n=1}^N psf_{ln}^k(f) p_{S_n}^k(f) + w_l^k(t^k) \sum_{m=1}^M g_{ml}^{k,*}(f) b_m^k(f) \right|^2 \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K psf_{ln}^k(f) psf_{ln'}^{k,*}(f) p_{S_n}^k(f) p_{S_{n'}}^{k,*}(f) \right] \\ &\quad + w_l^{k,2}(t^k) \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K g_{ml}^{k,*}(f) g_{m'l}^k(f) b_m^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) \right] \\ &\quad + 2w_l^k(t^k) \mathcal{Re} \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K psf_{ln}^k(f) g_{ml}^k(f) p_{S_n}^k(f) b_m^{k,*}(f) \right] \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

Pour un nombre de blocs K suffisant, avec l'hypothèse réaliste d'indépendance entre le milieu de propagation et les signaux des sources, il est possible d'écrire avec $\mathbb{E}[\cdot]$ l'opérateur d'espérance mathématique :

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_s f_{ln}^k(f) p_s f_{ln'}^{k,*}(f) p_{s_n}^k(f) p_{s_n'}^{k,*}(f) &= \mathbb{E} \left[p_s f_{ln}^k(f) p_s f_{ln'}^{k,*}(f) p_{s_n}^k(f) p_{s_n'}^{k,*}(f) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[p_s f_{ln}^k(f) p_s f_{ln'}^{k,*}(f) \right] \mathbb{E} \left[p_{s_n}^k(f) p_{s_n'}^{k,*}(f) \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

Avec l'hypothèse réaliste d'un bruit de mesure décorrélié des sources, *i.e.* $\mathbb{E} \left[p_{s_n}^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) \right] = 0$, une démonstration similaire permet d'écrire :

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_s f_{ln}^k(f) g_{m'l}^k(f) p_{s_n}^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) &= \mathbb{E} \left[p_s f_{ln}^k(f) g_{m'l}^k(f) p_{s_n}^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[p_s f_{ln}^k(f) g_{m'l}^k(f) \right] \mathbb{E} \left[p_{s_n}^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) \right] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

De même, l'indépendance du bruit de mesure avec la propagation acoustique et la décorrélation du bruit de mesure entre deux capteurs différents A_m et $A_{m'}$ permettent d'écrire :

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K g_{ml}^{k,*}(f) g_{m'l}^k(f) b_m^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) &= \mathbb{E} \left[g_{ml}^{k,*}(f) g_{m'l}^k(f) b_m^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) \right] \\ &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[g_{ml}^{k,*}(f) g_{m'l}^k(f) \right] \mathbb{E} \left[b_m^k(f) b_{m'}^{k,*}(f) \right] \\ &= 0 \quad \text{si } m \neq m' \end{aligned} \quad (2.30)$$

La cohérence $\gamma_{nn'}(f)$ entre deux sources S_n et $S_{n'}$ est définie comme étant la grandeur :

$$\gamma_{nn'}(f) = \frac{|\mathbb{E} [p_s(S_n, f) p_s^*(S_{n'}, f)]|^2}{\mathbb{E} [|p_s(S_n, f)|^2] \mathbb{E} [|p_s(S_{n'}, f)|^2]} \in [0, 1] \quad (2.31)$$

Deux sources S_n et $S_{n'}$ sont dites totalement cohérentes, respectivement incohérentes, à la fréquence f si $\gamma_{nn'}(f) = 1$, respectivement $\gamma_{nn'}(f) = 0$.

En supposant la présence de sources incohérentes uniquement, il est possible d'écrire, pour un nombre de blocs K suffisant :

$$\mathbb{E} [p_s(S_n, f) p_s^*(S_{n'}, f)] = 0 \quad \text{si } n \neq n' \quad (2.32)$$

L'estimateur du Beamforming-MS par bloc au point X_l à la fréquence f s'écrit donc théoriquement, en utilisant l'indice \cdot_{moy} pour noter l'opérateur de moyenne $\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\cdot)^k$:

$$\Gamma_{\text{BF}}(X_l, f) = \sum_{n=1}^N |p_s f(X_l, S_n, f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_s(S_n, f) + \sum_{m=1}^M |w_l(t)^2 g(A_m, X_l, f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_b(A_m, f) \quad (2.33)$$

Cette équation fait donc intervenir $\Gamma_s(S_n, f) = |p_s(S_n, f)|_{\text{moy}}^2$ qui est une estimée de l'autospectre de la source en S_n , $\Gamma_b(A_m, f) = |b(A_m, f)|_{\text{moy}}^2$ qui est une estimée de l'autospectre du bruit de mesure au capteur A_m et la valeur en X_l de la réponse d'antenne moyenne

$|psf(X_l, S_n, f)|_{\text{moy}}^2$ centrée en S_n à chaque instant t^k :

$$|psf(X_l, S_n, f)|_{\text{moy}}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |psf^k(X_l(t^k), S_n(t^k), f)|^2 \quad (2.34)$$

Sous ces hypothèses, la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc peut s'écrire matriciellement pour tous les points focalisés \mathbf{x} à la fréquence f de la façon suivante [Fleury 2011] :

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f) &= \sum_{n=1}^N \mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)_{\text{moy}}^2 \Gamma_s(S_n, f) \\ &+ \left[|w_1(t)^2 \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_1, f)|_{\text{moy}}^{2,T} \Gamma_b(\mathbf{a}; f), \dots, |w_L(t)^2 \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_L, f)|_{\text{moy}}^{2,T} \Gamma_b(\mathbf{a}; f) \right]^T \\ &= |\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{s}; f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_s(\mathbf{s}; f) \\ &+ \left[|w_1(t)^2 \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_1, f)|_{\text{moy}}^{2,T} \Gamma_b(\mathbf{a}; f), \dots, |w_L(t)^2 \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_L, f)|_{\text{moy}}^{2,T} \Gamma_b(\mathbf{a}; f) \right]^T \end{aligned} \quad (2.35)$$

avec :

- $\mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)_{\text{moy}}^2 = [|psf(X_1, S_n, f)|_{\text{moy}}^2, \dots, |psf(X_L, S_n, f)|_{\text{moy}}^2]^T$ le vecteur des valeurs de la réponse d'antenne moyenne dont le lobe principal est localisé en S_n à chaque instant t^k
- $|\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{s}; f)|_{\text{moy}}^2$ la matrice des réponses d'antenne moyennes dont la n -ième colonne est $\mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)_{\text{moy}}^2$,
- $\Gamma_s(\mathbf{s}; f) = [\Gamma_s(S_1, f), \dots, \Gamma_s(S_N, f)]^T$ le vecteur des autospectres des sources,
- $\Gamma_b(\mathbf{a}; f) = [\Gamma_b(A_1, f), \dots, \Gamma_b(A_M, f)]^T$ le vecteur des autospectres des bruits de mesure

Ainsi, cette expression montre que la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc s'exprime en fonction des autospectres des sources $\Gamma_s(\mathbf{s}; f)$ en utilisant une grille de calcul \mathbf{x} englobant au moins l'ensemble des sources. L'équation (2.35) a été établie en supposant les hypothèses de sources incohérentes, de bruit de mesure décorrélié des sources, d'indépendance des sources avec la propagation et d'indépendance du bruit de mesure avec la propagation. Les maxima de l'estimateur de Beamforming-MS évalué sur la grille de calcul \mathbf{x} fournissent une estimée des localisations des sources. Cependant, du fait de l'existence de la réponse d'antenne moyenne, l'estimateur de Beamforming-MS ne permet pas d'estimer précisément les autospectres des sources car chaque source estimée contribue à l'estimation des autres sources par les lobes de la réponse d'antenne moyenne. Les méthodes de déconvolution du Beamforming-MS qui sont présentées prochainement permettront d'améliorer l'estimation énergétique des sources en supprimant la réponse d'antenne moyenne.

2.3.2 Performances de la formation de voies pour sources mobiles

Les performances en localisation de la méthode initiale d'imagerie acoustique de véhicule au passage sont maintenant étudiées pour la configuration de l'étude de navire au passage présentée dans le paragraphe 1.4.2.1. L'intérêt d'une telle étude est la bonne connaissance des performances de la méthode de localisation de sources pour pouvoir les spécifier

à un utilisateur ou bien concevoir un système matériel répondant aux spécifications de performances données par un cahier des charges [Ferréol 2005].

Comme mis en évidence par l'équation (2.35), le résultat théorique du Beamforming-MS sous les hypothèses précédentes est le produit des autospectres des sources avec les réponses d'antenne moyennes. La réponse d'antenne moyenne contient toutes les informations relatives à la propagation acoustique comme le montre l'équation (2.34). En pratique, le milieu de propagation n'est jamais connu exactement et il existe des écarts entre le modèle de propagation et la propagation réelle qui seront appelés *erreurs de modèle* et qui affectent les réponses d'antenne moyennes. Il est donc nécessaire d'évaluer la sensibilité des performances de localisation de sources du Beamforming-MS aux erreurs de modèle. De plus, il est également nécessaire d'évaluer la sensibilité du Beamforming-MS au bruit de mesure et à la cohérence entre sources. En effet, d'après l'étude bibliographique des sources acoustiques de navire de surface et de la modélisation des sources du chapitre 1, les sources hydroacoustiques issues de phénomènes aléatoires sont généralement supposées incohérentes mais les sources vibroacoustiques des machines internes peuvent être cohérentes du fait de la réponse vibratoire modale de la coque du navire.

La formation de voies classique, pour sources fixes, étant une méthode largement utilisée en traitement d'antenne, ses performances de localisation de sources ont été étudiées par nombreux auteurs dans la littérature et sont donc maîtrisées. Différentes publications proposent des formulations analytiques au premier ordre de l'erreur de localisation de la formation de voies pour sources fixes et de méthodes de sous-espaces classiques [Li 1991, Swindlehurst 1992, Hobbs 1992, Marsal 1993]. La variance de l'erreur de localisation est calculée par des tirages aléatoires d'erreurs de modèles (position des hydrophones, bruit de mesure, célérité) et permet d'évaluer des intervalles d'incertitudes sur l'estimation de localisation fournie par la méthode. Cette variance peut être comparée à la Borne Inférieure de Cramér-Rao correspondant à la variance minimale de l'erreur de localisation calculée par Barabell [Barabell 1998].

Cette sous-section présente donc d'abord une comparaison entre la réponse d'antenne moyenne pour une source mobile et la réponse d'antenne pour une source fixe. Ceci permet d'appréhender la différence entre une configuration de sources fixes et une configuration de sources mobiles. Puis, l'influence des incertitudes de propagation sur la réponse d'antenne moyenne est analysée en termes d'erreur de localisation, de résolution et de dynamique. Ensuite, les performances en localisation de sources de la méthode de Beamforming-MS sont évaluées en fonction du niveau de bruit de mesure et de la cohérence entre deux sources. Ces études sont réalisées sur des cas simulés de sources ponctuelles monopolaires.

Configuration des simulations de l'étude des performances en localisation

Dans cette sous-section, les paramètres de simulation utilisés pour l'étude des performances des méthodes d'imagerie acoustique sont présentés dans la table 2.1 et les géométries sont représentées sur la figure 2.10.

Paramètres des simulations :

Les coordonnées des points sont définies dans le repère cartésien et exprimées en mètres (m).

- Célérité : $c = 1500m.s^{-1}$
- Fréquence d'échantillonnage : $F_e = 25600Hz$
- Résolution fréquentielle : $\Delta f = 10Hz$
- Durée de l'acquisition : $T_{acq} = 4s$
- $K = 79$ blocs de durée $T = 100ms$ avec un recouvrement de 50%
- Antenne linéaire régulière de 9 microphones espacés de $50cm$ selon l'axe x , centrée en l'origine du repère. Pour cette géométrie, la bande fréquentielle d'utilisation de l'antenne est $[500Hz; 2000Hz]$.
- Deux sources se déplacent parallèlement à l'axe x à la vitesse $v = 2m.s^{-1}$ avec une ordonnée fixe $y = 2,50m$ et une hauteur fixe $z = +10m$
- Les coordonnées des sources au sein de la grille de calcul sont : $S_1(-2m; 0m; 0m)$ et $S_2(+3m; 0m; 0m)$ par rapport au centre de la grille de calcul
- Les coordonnées des sources au début du passage sont : $S_1(0) = (-6m; 2,50m; +10m)$ et $S_2(t) = (-1m; 2,50m; +10m)$
- Les coordonnées des sources à la fin du passage sont : $S_1(T_{acq}) = (+2m; 2,50m; +10m)$ et $S_2(T_{acq}) = (+7m; 2,50m; +10m)$
- La grille de calcul, représentée en rouge sur la figure 2.10, est un ensemble de $L = 301$ points équidistants de 10 cm selon x qui englobe les points sources à chaque instant.

TABLE 2.1 – Paramètres des configurations de simulation pour l'étude des performances des méthodes d'imagerie acoustique.

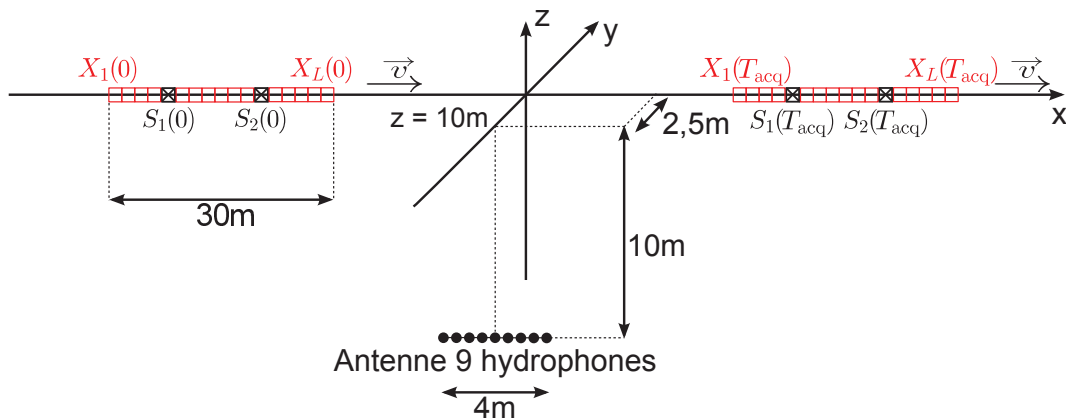


FIGURE 2.10 – Configuration de simulation pour l'étude de performances des méthodes d'imagerie acoustique.

2.3.2.1 Réponse d'antenne moyenne et erreurs de modèle

Ce paragraphe présente l'allure de la réponse d'antenne moyenne pour la configuration de la table 2.1 et une étude de ses performances en présence d'erreurs de modèle.

Performances de la réponse d'antenne moyenne

La réponse d'antenne moyenne intervient dans l'expression de la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc de l'équation (2.35). Afin de comparer les performances de la formation de voies classique et du Beamforming-MS, nous comparons une réponse d'antenne et une réponse d'antenne moyenne. Une source mobile est simulée avec les paramètres de la table 2.1, cette source est positionnée au point $S_n(t)$ au centre d'une grille de calcul x de 30 mètres de long. La réponse d'antenne moyenne $|\mathbf{psf}(\mathbf{x}; S_n, f)|_{\text{moy}}^2$ associée à cette source mobile est représentée sur la figure 2.11b pour des fréquences $f \in [500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$. Cette figure est une image représentant la réponse d'antenne moyenne dans le plan distance-fréquence (x, f) évaluée en decibels, l'abscisse correspond aux coordonnées selon x des points de calcul $X_l, l \in [1, L]$ et l'ordonnée correspond à la fréquence de travail f . Pour la même configuration, la réponse d'antenne de la formation de voies classique pour une source fixe positionnée en $x = 0\text{m}$ est représentée sur la figure 2.11a pour des fréquences $f \in [500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$.

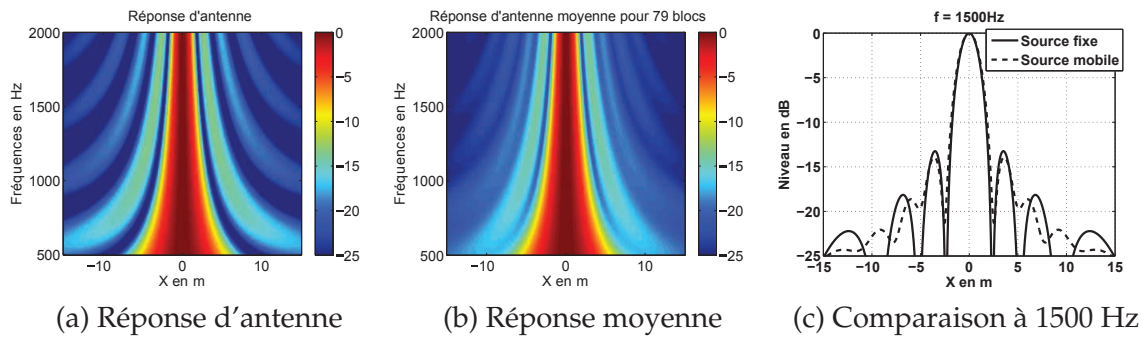


FIGURE 2.11 – Comparaison en dB de la réponse d'antenne et de la réponse d'antenne moyenne pour un Beamforming-MS en $x = 0\text{m}$ (en face de l'antenne) avec la configuration de la table 2.1.

Sur la figure 2.11c, la réponse d'antenne est tracée en trait continu et la réponse d'antenne moyenne est tracée en tirets, à la fréquence $f = 1500\text{Hz}$. Cette figure montre que la réponse d'antenne moyenne possède une largeur de lobe principal à -3dB légèrement supérieure à celle de la réponse d'antenne et des lobes secondaires plus lisses et plus bas qui témoignent d'une meilleure dynamique. Ces effets sont logiques puisque la réponse d'antenne moyenne résulte de la moyenne de réponses d'antenne en différentes positions, les lobes secondaires à des positions différentes pour chaque bloc sont donc lissés.

Les figures 2.12a et 2.12b représentent la résolution et la dynamique de la réponse d'an-

tenne pour une source fixe en tirets et de la réponse d'antenne moyenne pour une source mobile en trait continu, mesurées sur une grille de calcul de 30 mètres de long selon x .

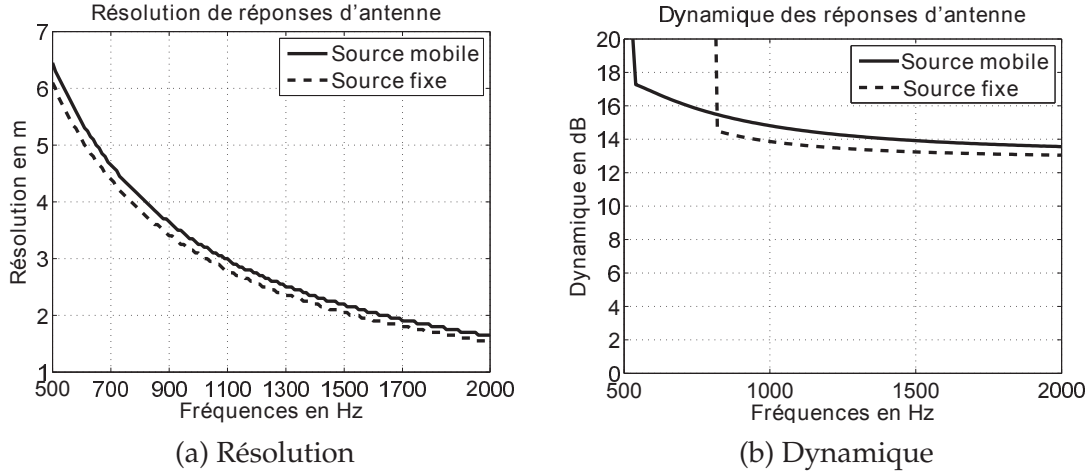


FIGURE 2.12 – Résolutions en mètres et dynamiques en dB de la réponse d'antenne pour une source fixe en tirets et de la réponse d'antenne moyenne pour une source mobile en trait continu.

Les figures 2.12a et 2.12b confirment que, du fait de la moyenne sur la trajectoire, la réponse d'antenne moyenne a une résolution plus large d'environ 25 centimètres et une dynamique meilleure d'environ 0,5 dB que la réponse d'antenne pour une source fixe, sur la bande [500Hz;2000Hz].

En conclusion, les performances de la réponse d'antenne moyenne sont donc très proches de celles de la réponse d'antenne pour une source fixe. Les résultats obtenus par Beamforming-MS par bloc présenteront donc des caractéristiques similaires à des résultats de formation de voies classique calculés pour des sources fixes. De plus, l'étude de la sous-section 2.2.3 sur l'optimisation de la géométrie d'antenne affecte donc directement les performances de la réponse d'antenne moyenne : l'amélioration des performances de la réponse d'antenne permet une amélioration des performances de la réponse d'antenne moyenne.

Performances de la réponse d'antenne moyenne avec des erreurs de modèle

Lorsque la propagation des ondes acoustiques émise par la source ne suit pas le modèle de propagation *a priori*, les erreurs de modèle sont intégrées dans l'expression de la réponse d'antenne moyenne formant la réponse d'antenne moyenne *perturbée*. D'après les équations (2.34) et (2.35), la réponse d'antenne moyenne perturbée est notée $|\widetilde{\mathbf{psf}}(\mathbf{x}; S_n, f)|_{\text{moy}}^2$, avec le symbole $\widetilde{\cdot}$ signifiant que la quantité est *perturbée*, et son l -ième terme s'écrit :

$$|\widetilde{\mathbf{psf}}(X_l, S_n, f)|_{\text{moy}}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w_l(t^k) \mathbf{g}^H(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \widetilde{\mathbf{g}}(\mathbf{a}; S_n(t^k), f) \quad (2.36)$$

avec $\tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{a}; S_n(t^k), f)$ le vecteur de fonctions de transfert réelles entre l'antenne \mathbf{a} et le point source S_n . Ce vecteur caractérise les transferts réels entre l'antenne et la source au k -ième bloc temporel et il contient les erreurs de modèles associées au point $S_n(t^k)$.

Dans ce paragraphe, nous étudions les performances de la réponse d'antenne moyenne uniquement liées :

- à la propagation acoustique telles que les erreurs de célérité
- aux géométries de mesure telles que les erreurs de positionnement des hydrophones et les erreurs de calibration des hydrophones

Les performances étudiées (fig. 2.4) ici sont l'erreur de localisation du maximum du lobe principal, la résolution et la dynamique de la réponse d'antenne moyenne perturbée par les erreurs de modèle, $|\widetilde{\mathbf{psf}}(\mathbf{x}; S_n, f)|_{\text{moy}}^2$.

Cette étude de performances est réalisée par des simulations de type Monte-Carlo afin d'avoir plusieurs observations des signaux mesurés avec des tirages aléatoires d'erreurs de modèle. Cette méthode permet d'étudier tout type d'erreurs de modèle. À partir de ces tirages aléatoires, les moments statistiques des performances de la réponse d'antenne moyenne peuvent ainsi être calculées, par exemple la moyenne et l'écart-type de l'erreur de localisation ou de la dynamique, et un intervalle de confiance peut être calculé. Cet intervalle de confiance (IC) représente la dispersion de 95% des valeurs des performances, il est formellement écrit :

$$\text{IC} = [\text{moyenne} - 1,96.\text{écart-type}; \text{moyenne} + 1,96.\text{écart-type}] \quad (2.37)$$

Les densités de probabilité utilisées pour modéliser les erreurs de modèle sont des densités de loi normale de moyenne μ et d'écart-type σ , notées $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$. La réponse d'antenne moyenne perturbée est calculée pour une source mobile d'amplitude unitaire localisée au centre de la grille de calcul à chaque instant, avec les paramètres géométriques présentés dans la table 2.1.

Dans les figures de résultat, les performances de la réponse d'antenne moyenne perturbée sont représentées par leur valeur moyenne et par leur intervalle de confiance. Pour cette étude statistique, il faut choisir un nombre de tirages aléatoires suffisamment grand pour que les moments statistiques des performances de la réponse d'antenne perturbée, *i.e.* la moyenne et l'écart-type, aient convergé. Pour cette recherche du nombre de tirages aléatoires nécessaires, nous considérons le cas de l'erreur de calibration qui sera détaillé dans ce qui suit. Les valeurs moyennes et les écart-types de la dynamique sont calculées à la fréquence 1500 Hz pour différents nombres de tirages aléatoires.

La figure 2.13 montre que les moments statistiques varient peu avec le nombre de tirages aléatoires. Nous pouvons tout de même attester qu'elles atteignent une valeur stable, *i.e.* converge, aux environs de 800 tirages aléatoires. Nous considérerons donc ce nombre pour l'étude statistique des performances de localisation de sources qui suit.

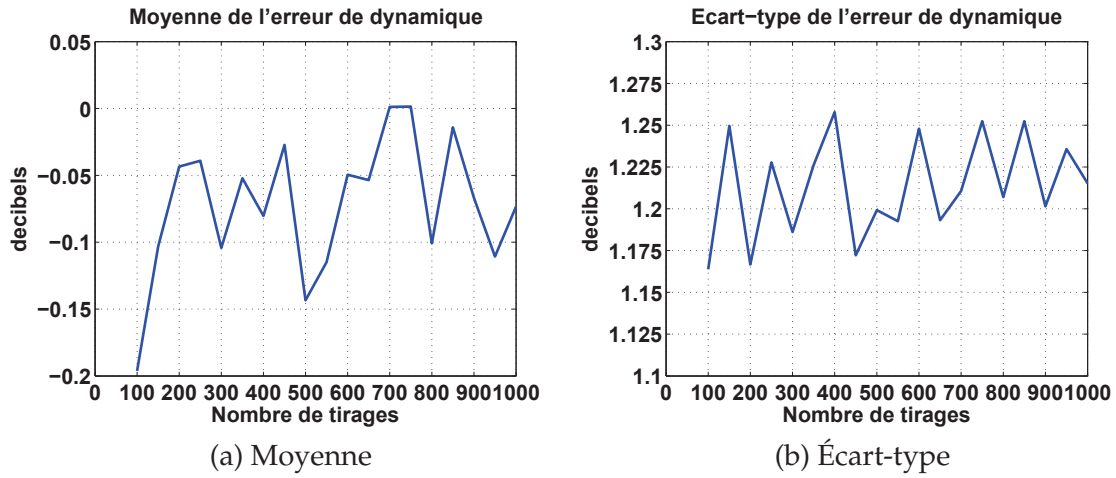


FIGURE 2.13 – Moyenne et écart-type de l'erreur sur la dynamique de la réponse d'antenne moyenne perturbée avec l'erreur de calibration définie dans cette étude.

Erreur de célérité

Le premier type d'erreurs de modèle est une erreur de célérité, 800 tirages aléatoires sont réalisés pour une variable aléatoire gaussienne représentant l'erreur de célérité $\epsilon_c \sim \mathcal{N}(0m.s^{-1}, 5m.s^{-1})$. La célérité des ondes acoustiques dans l'eau peut s'estimer avec une bonne précision avec la formule de Clay et Medwin [Clay 1977]. Selon ce modèle, pour une profondeur de 10 mètres et une salinité supposée nulle, une erreur de célérité de $5m.s^{-1}$ correspond à une variation de température d'environ $\pm 1,50^\circ c$ qui est représentative de l'incertitude dans notre étude. Il est donc réaliste de considérer un écart-type de $5m.s^{-1}$ pour la densité de probabilité de l'erreur de célérité.

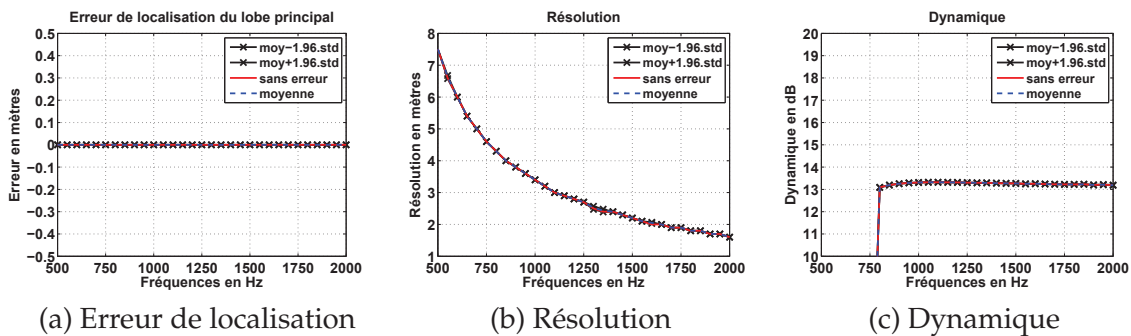


FIGURE 2.14 – 800 tirages aléatoires d'erreur de célérité : Performances de la réponse d'antenne moyenne sans erreur (—), valeurs moyennes des performances de la réponse d'antenne moyenne perturbée (—) et intervalles de confiance des performances de la réponse d'antenne moyenne perturbée délimités par des croix (—x—).

L'erreur de localisation du maximum du lobe principal, la résolution et la dynamique de la réponse d'antenne moyenne sont représentées sur la figure 2.14. Les valeurs moyennes

des performances de la réponse d'antenne moyenne avec erreur de célérité sont représentées en tirets (—) et les bornes de l'intervalle de confiance formulées par l'équation (2.37) sont représentées par des croix (—x—). Ces performances sont comparées à celles de la réponse d'antenne moyenne sans erreur de célérité qui sont représentées en trait continu (—).

La figure 2.14 montre que les performances de la réponse d'antenne moyenne en présence d'erreurs de célérité d'écart-type $5m.s^{-1}$ sont égales aux performances de la réponse d'antenne moyenne sans erreur. Cela prouve que la réponse d'antenne moyenne est insensible à cette petite variation de célérité qui est une erreur souvent commise en pratique.

Erreur de positionnement des capteurs

Le deuxième type d'erreurs de modèle étudié ici est une erreur de positionnement des capteurs dans la direction de l'antenne linéaire. 800 tirages aléatoires de M variables aléatoires gaussiennes correspondant aux erreurs de positionnement des M capteurs sont réalisés. Les erreurs de positionnement des capteurs sont considérées comme des variables aléatoires indépendantes entre les capteurs et ces erreurs sont constantes sur toute la durée d'une acquisition. La densité de probabilité de l'erreur de positionnement d'un capteur A_m suit la loi normale $\epsilon_h(A_m) \sim \mathcal{N}(0cm, 2cm)$. Cette valeur d'écart-type correspond à 4% de l'espacement inter-capteur qui est égal à 50 centimètres, ce qui est réaliste.

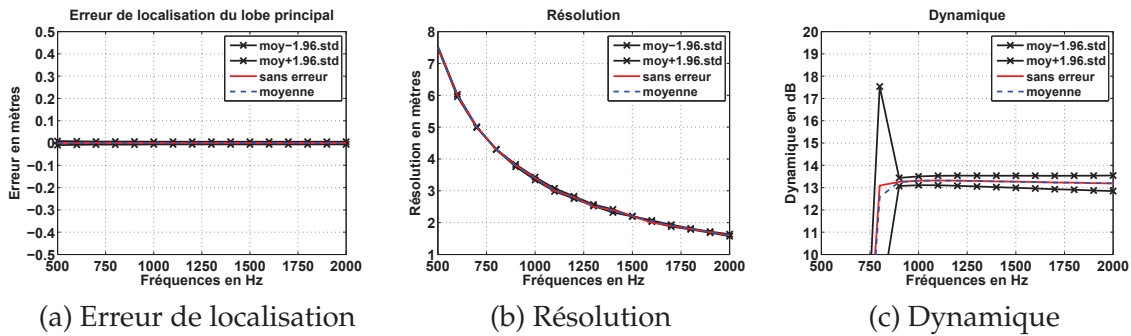


FIGURE 2.15 – 100 tirages aléatoires d'erreur de positionnement des hydrophones : Performances de la réponse d'antenne moyenne sans erreur (—), valeurs moyennes des performances de la réponse d'antenne moyenne perturbée (—) et intervalles de confiance des performances de la réponse d'antenne moyenne perturbée délimités par des croix (—x—).

L'erreur de localisation du maximum du lobe principal, la résolution et la dynamique de la réponse d'antenne moyenne sont représentées sur la Figure 2.15. Les valeurs moyennes des performances de la réponse d'antenne moyenne avec erreur de positionnement des capteurs sont représentées en tirets (—) et les bornes de l'intervalle de confiance formulées par l'équation (2.37) sont représentées par des croix (—x—). Ces performances sont comparées à celles de la réponse d'antenne moyenne sans erreur de positionnement qui sont représentées en trait continu (—).

Cette erreur de positionnement n'introduit pas d'erreur de localisation du maximum

de la réponse d'antenne moyenne et ne fait pas varier en moyenne la résolution et la dynamique. Il est cependant à noter une dispersion de la résolution de 50cm sur $[1100\text{Hz}; 1800\text{Hz}]$ et de plus ou moins 1dB sur la dynamique. L'erreur de positionnement perturbe peu la réponse d'antenne moyenne et donc peu la localisation par Beamforming-MS. Cependant, on peut noter que les variations de dynamique et de résolution par rapport au cas sans erreur pourra perturber la déconvolution du résultat du Beamforming-MS, notamment en étendant la localisation d'une source ponctuelle et en augmentant le nombre de sources non physiques.

Performances pour des erreurs de calibration des capteurs

Le dernier type d'erreur de modèle est une erreur de calibration en amplitude et en phase affectant indépendamment chaque capteur et indépendant de la distribution source [Marsal 1993, Nam 1999]. Les erreurs de calibration des capteurs sont considérées comme des variables aléatoires indépendantes entre les capteurs et ces erreurs sont constantes sur toute la durée d'une acquisition. Une erreur de calibration en amplitude $\epsilon_a(A_m)$ et une erreur de calibration en phase $\epsilon_\phi(A_m)$ sont définies pour chaque capteur. L'erreur complexe de calibration totale $\epsilon_a(A_m) \exp(j\epsilon_\phi(A_m))$ est définie comme étant un coefficient multiplicateur de la pression acoustique $\check{p}(A_m, t)$ mesurée au capteur A_m . Les densités de probabilité des erreurs de calibration du capteur A_m sont des lois normales, $\epsilon_a(A_m) \sim \mathcal{N}(1, 10^{-1})$ et $\epsilon_\phi(A_m) \sim \mathcal{N}(0^\circ, 5^\circ)$. 800 tirages aléatoires de $2M$ variables aléatoires sont donc réalisés. Le choix d'une erreur de calibration en amplitude d'écart-type $10^{-1} = 10\%$ autour de la valeur moyenne de calibration est motivé par le fait que l'incertitude d'un calibrateur en amplitude d'hydrophone possède une incertitude de $\pm 0,7\text{dB}$, ce qui correspond à une incertitude sur la calibration de l'hydrophone de 8% . En revanche, la valeur de l'écart-type de l'erreur de phase a été choisie arbitrairement en adoptant celle employée dans l'article de Nam *et al.* [Nam 1999].

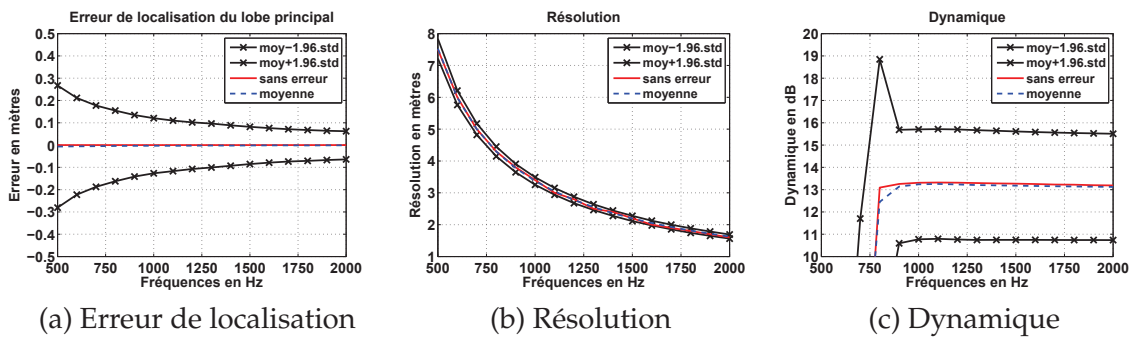


FIGURE 2.16 – 100 tirages aléatoires d'erreurs de calibration : Performances de la réponse d'antenne moyenne sans erreur (—), valeurs moyennes des performances de la réponse d'antenne moyenne perturbée (—) et intervalles de confiance des performances de la réponse d'antenne moyenne perturbée délimités par des croix (—x—).

L'erreur de localisation du maximum du lobe principal, la résolution et la dynamique de la réponse d'antenne moyenne sont représentées sur la Figure 2.16. Les performances de la

réponse d'antenne moyenne avec erreur de calibration sont représentées en tirets (--) et les bornes de l'intervalle de confiance formulées par l'équation (2.37) sont représentées par des croix (x-). Ces performances sont comparées à celles de la réponse d'antenne moyenne sans erreur de positionnement qui sont représentées en trait continu (—).

La figure 2.16 montre d'importantes dégradations des performances de la réponse d'antenne moyenne sous l'influence de ces erreurs de calibration. En effet, l'erreur de localisation du maximum du lobe principal de la réponse d'antenne moyenne (fig. 2.16a) et la résolution (fig. 2.16b) varient de plusieurs dizaines de centimètres. Les valeurs de dynamique sont comprises dans un intervalle d'incertitude de $\pm 2dB$ autour de la dynamique de la réponse d'antenne moyenne sans erreur, d'après la figure 2.16c. L'importance des dégradations de performances est toutefois relative. En effet, comme il l'a été évoqué lors de la présentation du Beamforming-MS par bloc, il est possible de négliger le déplacement des sources durant un bloc temporel de durée $T = 100ms$. Ainsi, pour des vitesses de sources égales à $v \leq 4m.s^{-1}$, le déplacement des sources durant un bloc est compris entre 20 centimètres à 40 centimètres. La dispersion de l'erreur de localisation (fig. 2.16a) et des valeurs de résolution (fig. 2.16b) de quelques dizaines de centimètres est donc inférieure ou égale au déplacement des sources pendant un bloc. La dégradation de dynamique (fig. 2.16c) de quelques decibels sera éventuellement problématique pour la localisation de plusieurs sources de niveaux différents de plus de $10dB$.

2.3.2.2 Beamforming-MS et erreurs de modèle

L'influence de la méconnaissance de l'environnement de mesure a été évaluée au travers de l'étude des performances de la réponse d'antenne moyenne, dans le paragraphe précédent. Les performances de localisation de plusieurs sources en fonction des propriétés des signaux mesurés telles que le niveau de bruit de mesure et le niveau de cohérence entre les sources sont maintenant étudiées. Dans ce paragraphe, les performances de localisation du Beamforming-MS par bloc étudiées sont les mêmes que pour la réponse d'antenne moyenne à savoir l'erreur de localisation, de résolution et de dynamique.

Performances pour deux sources incohérentes et du bruit de mesure

Deux sources incohérentes de bruit blanc sont simulées avec les paramètres présentés dans la table 2.1. Dans le cas d'une expérience de bruit de passage, le Rapport Signal sur Bruit (RSB) varie au cours du temps du fait de la variation de la distance entre les sources et l'antenne au cours du temps. Le RSB est maximal lorsque les sources sont en face de l'antenne et diminue lorsque les sources s'éloignent de l'antenne. Une convention doit être choisie pour définir le RSB moyen d'une expérience de bruit de passage, il est défini en decibels pour un capteur A_m de la façon suivante pour les simulations :

$$RSB_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{T_{acq} \times B_F} |p(A_m, t) - b(A_m, t)|^2 dt}{\int_{T_{acq} \times B_F} |b(A_m, t)|^2 dt} \quad (2.38)$$

avec T_{acq} l'intervalle temporel de l'étude et B_F signifie que les signaux ont été filtrés dans la bande fréquentielle des sources qui est ici $[300\text{Hz}; 3000\text{Hz}]$.

Un bruit de mesure blanc, gaussien, additif et décorrélé est ajouté sur chaque capteur de l'antenne de telle sorte que le rapport signal sur bruit soit de 5dB .

Afin d'apprécier visuellement les performances de l'estimation de la localisation des sources par Beamforming-MS en présence de bruit de mesure, deux résultats de localisation dans le plan distance-fréquence $[-15\text{m}; +15\text{m}] \times [500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$ sont représentés sur la figure 2.17. Le Beamforming-MS par bloc localise bien les deux sources repérées par les lignes verticales blanches sur la figure 2.17, pour des fréquences supérieures à 700Hz . Ce seuil de fréquences correspond à la limite de résolution de deux sources distantes de 5mètres mise en évidence par la résolution de la réponse d'antenne moyenne représentée sur la figure 2.12a, pour la géométrie de mesures décrite par la table 2.1. Le bruit de mesure présent dans le résultat de la figure 2.17b a pour effet de diminuer la dynamique du résultat de localisation. Cela s'apprécie visuellement par un fond de carte plus "vert" pour le résultat bruité de la figure 2.17b que le résultat sans bruit de mesure de la figure 2.17a.

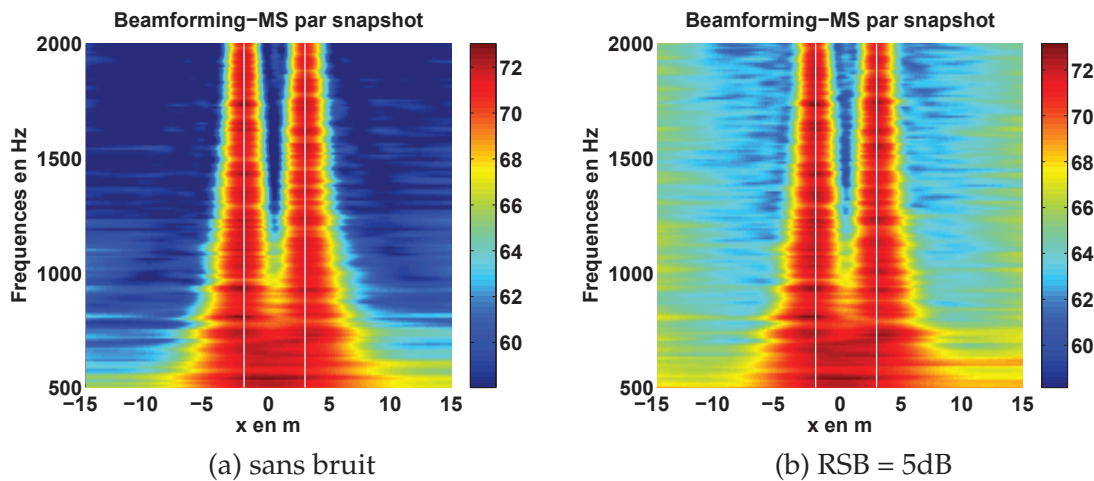


FIGURE 2.17 – Simulation sans bruit de mesure (a) et simulation avec un bruit de mesure associé à $RSB = 5\text{dB}$ (b). Localisation de sources par Beamforming-MS. Les positions théoriques des sources sont représentées par des lignes verticales blanches.

La figure 2.18 représente la localisation des deux sources incohérentes précédentes par Beamforming-MS pour différentes valeurs de RSB à la fréquence $f = 750\text{Hz}$ (fig. 2.18a) et à la fréquence $f = 1500\text{Hz}$ (fig. 2.18b). L'effet d'un bruit de mesure blanc additif se traduit par un seuil d'énergie, sur toute la grille de calcul et à chaque fréquence, dont la valeur augmente plus le RSB est faible. C'est une observation similaire au cas de la formation de voies classique pour une configuration de sources fixes.

Pour conclure, le bruit de mesure diminue la dynamique de localisation du Beamforming-MS, dégradant ainsi la localisation de sources ayant des niveaux différents.

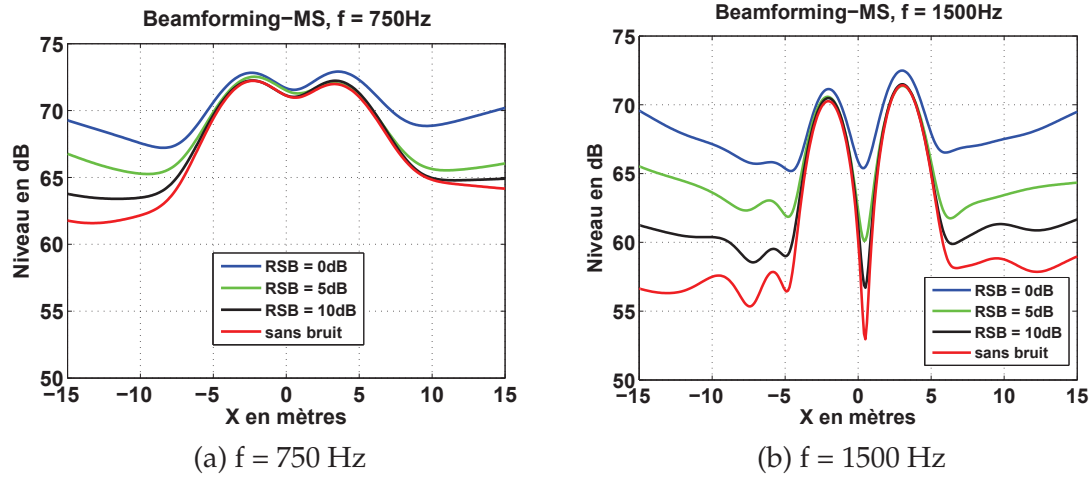


FIGURE 2.18 – Simulation avec deux sources incohérentes pour des cas sans bruit de mesure (en rouge), avec $RSB = 10dB$ (en noir), avec $RSB = 5dB$ (en vert) et avec $RSB = 0dB$ (en bleu). Localisation de sources aux fréquences $f = 750Hz$ et $f = 1500Hz$ par Beamforming-MS.

Les sources de niveau faible ne seront alors pas localisées. Le bruit de mesure n'introduit pas d'erreur de localisation et ne dégrade pas la résolution du Beamforming-MS sauf pour un bruit de mesure de $RSB = 0dB$. En effet, pour ce niveau de bruit, la résolution est dégradée comme le montre la figure 2.18.

Performances pour deux sources cohérentes

L'effet de la cohérence de deux sources sur le Beamforming-MS est étudié en utilisant des simulations de deux sources de bruit blanc totalement cohérentes avec les paramètres de simulation présentés dans la table 2.1, sans bruit de mesure. D'après l'équation (2.31), la fonction de cohérence entre deux sources est égale à 1 si elles sont déphasées d'un déphasage constant au cours du temps. La figure 2.19 représente les résultats du Beamforming-MS pour la simulation de deux sources totalement cohérentes en phase en rouge, cohérentes en opposition de phase en vert et incohérentes comme précédemment en tirets bleus. Ces résultats sont représentés à la fréquence 750 Hz sur la figure 2.19a et à la fréquence 1500 Hz sur la figure 2.19b.

Au vu des figures 2.19a et 2.19b, les sources sont localisées avec une résolution identique pour les trois types de sources. En revanche, à la fréquence 750 Hz, le Beamforming-MS possède de faibles erreurs de localisation comme le montre la table 2.2.

Les erreurs de localisation sont de l'ordre du déplacement des sources pendant un bloc temporel, *i.e.* 20 centimètres, elles sont de ce fait considérées comme faibles. D'après la table 2.2, la dynamique de localisation est la même pour la simulation de sources incohérentes que pour la simulation de sources cohérentes en opposition de phase. En revanche, la dynamique de localisation est meilleure de 1,6 dB pour la simulation de sources cohérentes en phase en

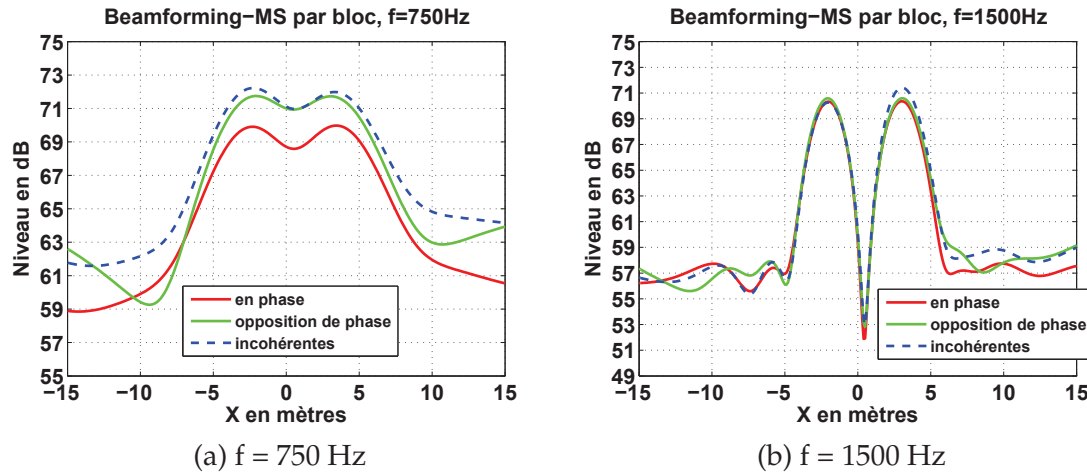


FIGURE 2.19 – Simulation avec deux sources de bruit blanc incohérentes, cohérentes en phase et cohérentes en opposition de phase. Localisation de sources par Beamforming-MS, les positions théoriques des sources sont représentées par des lignes verticales blanches.

Type de source	Dynamique	Erreur de localisation
En phase	9,4dB	Erreur sur \hat{S}_1 : -0.3m Erreur sur \hat{S}_2 : 0.4m
En opposition de phase	7,8dB	Erreur sur \hat{S}_1 : 0m Erreur sur \hat{S}_2 : 0m
Incohérentes	7,8dB	Erreur sur \hat{S}_1 : -0.3m Erreur sur \hat{S}_2 : +0.3m

TABLE 2.2 – Performances de localisation à $f = 750\text{Hz}$ du Beamforming-MS de la figure 2.19a.

comparaison avec les autres simulations.

En conclusion, les performances en localisation du Beamforming-MS sont peu sensibles à la cohérence entre sources puisque ces performances sont quasiment égales à celles obtenues pour le cas des sources incohérentes.

2.3.2.3 Effets de bords induits par une grande grille de calcul

Dans la configuration de simulation de la table 2.1, la grille de calcul est ici prise de largeur 30 mètres de telle sorte à pouvoir englober la longueur du navire de la configuration expérimentale de l'étude présentée dans le paragraphe 1.4.2.1. Cependant, cette largeur de grille est grande devant la distance de mesure, la pondération du Beamforming-MS induit donc une amplification non désirée des niveaux de sources estimées aux extrémités de la grille de calcul. La figure 2.20 schématise la géométrie d'une grille de largeur grande par rapport à la distance de mesure.

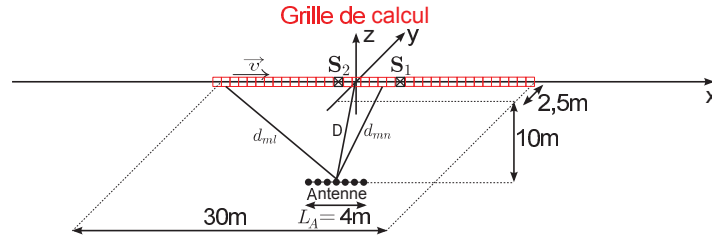


FIGURE 2.20 – Schéma d'une grille de points de calcul (en rouge) avec des distances par rapport aux capteurs de l'antenne très différente.

Considérant un point X_l à l'extrémité de la grille de calcul et un point X_n au centre de la grille de calcul, cet effet se traduit mathématiquement par des pondérations d'amplitudes très différentes car associées à des distances de calcul très différentes au sein d'une même grille de calcul : $w_l(t) \gg w_n(t)$ (éq. (2.18)). Cet effet est visible dans les résultats de Beamforming-MS de la figure 2.18 pour les fréquences $f = 750\text{Hz}$ et $f = 1500\text{Hz}$. En effet, le bruit de mesure augmente le niveau reconstruit sur toute la grille de calcul mais les niveaux reconstruits sur les extrémités de la grille de calcul sont beaucoup plus élevés. Ces effets de bords réduisent la dynamique du résultat de Beamforming-MS car des sources estimées avec des amplitudes inférieures à l'amplitude des effets de bords ne peuvent être considérées comme des sources localisées.

2.3.2.4 Résolution limitée en basses fréquences

La résolution de la formation de voies pour sources fixes est directement liée à l'envergure de l'antenne et à la longueur d'onde. D'après les notations géométriques de la figure 2.20, la résolution de la formation de voies pour sources fixes est, selon x :

$$\text{résolution} = \frac{\lambda D}{L_A} \quad (2.39)$$

avec D la distance de mesure, L_A l'envergure de l'antenne selon x et λ la longueur d'onde de l'onde acoustique mesurée. D'après la comparaison de résolution entre la formation de voies pour sources fixes et le Beamforming-MS qui est représentée sur la figure 2.12a, nous en déduisons que la résolution du Beamforming-MS suit approximativement cette loi de résolution.

De plus, au vu de la figure 2.18, nous constatons que la résolution du Beamforming-MS qui dépend de la fréquence est limitante en basse fréquence. En effet, à la fréquence 750 Hz, les localisations des deux sources distantes de 5 mètres sont tout juste séparées. Si, on se réfère à la configuration expérimentale présentée dans le paragraphe 1.4.2.1, cela signifie que le Beamforming-MS pourra tout juste séparer 4 sources à la fréquence 750 Hz pour un navire de 21,5 mètres de longueur. Le diagnostic acoustique est donc limité en basses fréquences.

2.3.3 Déconvolution de la formation de voies pour sources mobiles

Dans le paragraphe 2.2.3, le choix de l'utilisation de la méthode de Beamforming-MS suivie de sa déconvolution a été réalisé pour accéder à la contribution énergétique des sources dans la signature acoustique du véhicule au passage. Les méthodes de déconvolution du Beamforming-MS ont pour objectif d'éliminer la présence de la réponse d'antenne dans les résultats du Beamforming-MS permettant ainsi :

1. d'améliorer la résolution et la dynamique de localisation de sources par Beamforming-MS limitées par la réponse d'antenne comme observé dans la sous-section 2.3.2,
2. d'estimer les autospectres des sources et donc d'accéder à l'information de contribution des sources.

Dans ce qui suit, le problème de déconvolution du Beamforming-MS est formulé et l'estimation de la contribution des sources est discutée. Puis, deux méthodes itératives de déconvolution du Beamforming-MS issues de la littérature, la méthode DAMAS-MS [Fleury 2011, LeCourtois 2012] et la méthode SDM [Bruhl 2000], sont détaillées et comparées en termes de performances de reconstruction. Enfin, le choix de la méthode SDM est motivé pour une application dans cette thèse.

2.3.3.1 Problème inverse de déconvolution et estimation énergétique des sources

Dans le domaine du bruit de passage, le problème d'estimation de la localisation et de la contribution énergétique des sources a pour objectif de construire une cartographie acoustique du véhicule. Une grille de calcul de L points est alors définie sur toute la longueur du véhicule afin d'englober les N sources acoustiques de celui-ci. Une première étape de calcul par Beamforming-MS délivre une première estimée de la localisation des sources en énergie et en position, sur les points de la grille de calcul $X_l, l \in [1, L]$. D'après l'équation (2.35), la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc est linéairement liée aux autospectres des N sources par la réponse d'antenne moyenne lorsque les sources sont incohérentes et que le milieu de propagation est exactement connu.

Afin d'estimer la localisation et la contribution des N sources à partir d'un premier résultat de Beamforming-MS, $\Gamma_{BF}(\mathbf{x}; f)$, les méthodes de déconvolution du Beamforming-MS visent à estimer les autospectres inconnus $\Gamma_x(\mathbf{x}; f)$ de L sources monopolaires incohérentes équivalentes qui seraient positionnées en chaque point de calcul $X_l, l \in [1, L]$. Le problème de déconvolution est formulé de la façon suivante en remplaçant $\Gamma_s(\mathbf{s}; f)$ par $\Gamma_x(\mathbf{x}; f)$ dans l'équation (2.35) :

$$\Gamma_{BF}(\mathbf{x}; f) = |\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_x(\mathbf{x}; f) + \left[|w_1(t)|^2 \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_1, f) |_{\text{moy}}^{2,T} \Gamma_b(\mathbf{a}; f), \dots, |w_L(t)|^2 \mathbf{g}(\mathbf{a}; X_L, f) |_{\text{moy}}^{2,T} \Gamma_b(\mathbf{a}; f) \right]^T \quad (2.40)$$

La figure 2.21 représente le problème de déconvolution pour des sources incohérentes et sans bruit de mesure en schématisant le produit de la matrice de réponses d'antenne

moyennes avec les autospectres des sources.

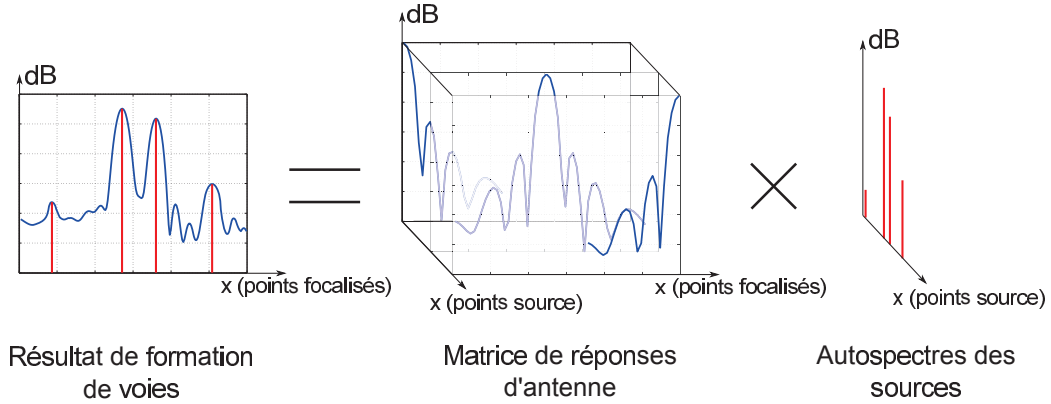


FIGURE 2.21 – Schéma du problème de la déconvolution du Beamforming-MS : estimation des autospectres de sources à partir du résultat du Beamforming-MS par bloc.

Le terme de bruit de mesure, *i.e.* le deuxième terme du membre de droite de l'équation (2.40), est inconnu mais il est supposé additif et décorrélié des sources. L'estimation des autospectres des sources équivalentes par inversion du problème linéaire de l'équation (2.40) présentera donc des erreurs si les erreurs de modèle définies en introduction de la sous-section 2.3.2 et le bruit de mesure ne sont pas correctement pris en compte. Lorsque de telles erreurs existent, elles entraîneront l'apparition d'artefacts dans les résultats de déconvolution correspondant à des *sources non physiques*.

On définit le conditionnement d'une matrice comme le rapport entre la plus grande valeur singulière de cette matrice et sa plus petite valeur singulière et on le note $\text{cond}(\cdot)$. Pour une configuration typique de notre étude, telle que la configuration de simulation décrite en introduction de la table 2.1, qui est constituée :

- d'une grille de calcul de $L = 301$ points équidistants de 10 centimètres selon l'axe x qui est centrée sur le navire,
- d'un navire au passage à la vitesse $v = 2m.s^{-1}$ au-dessus de l'antenne avec la géométrie d'étude du paragraphe 1.4.2.1,
- d'une trajectoire de navire d'une durée de 4 secondes selon x et symétrique par rapport au plan (xOz)

la matrice de réponse d'antenne moyenne est mal conditionnée car son conditionnement est très grand $\text{cond}(|\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)|_{\text{moy}}^2) \approx 2.10^{19}$. La valeur du conditionnement s'explique par le fait que les réponses d'antennes ont des formes très proches et que le nombre de points de calcul L est grand par rapport au nombre N de sources physiques à cause de la taille du navire à imager. La déconvolution du Beamforming-MS par inversion directe de la matrice de réponse d'antenne introduirait beaucoup d'erreurs de reconstruction avec ce mauvais conditionnement.

Dans cette étude, nous faisons donc le choix de méthodes itératives de déconvolution

pour éviter cette inversion directe. De plus, les méthodes non-négatives aux moindres carrés sont privilégiées car elles permettent de prendre en compte la positivité des autospectres inconnus des sources.

Estimation énergétique de la contribution des sources

Au vu de la revue bibliographique du chapitre 1, il est clair que la plupart des sources acoustiques d'un navire possèdent une étendue spatiale. Afin d'estimer la contribution énergétique de chaque source identifiée par déconvolution du Beamforming-MS, il convient donc de définir des zones dans le résultat de déconvolution correspondant aux différentes zones sources. La contribution d'une source est alors la somme des autospectres reconstruits, $\sum_{X_l \in Z_n} \hat{\Gamma}_x(X_l, f)$, dans la zone correspondante Z_n et la signature acoustique du véhicule est la

somme de tous les autospectres $\sum_{l=1}^L \hat{\Gamma}_x(X_l, f)$ du résultat de déconvolution. La figure 2.1 représente la définition de zones source à gauche et les spectres de contribution estimés par déconvolution à droite pour chaque zone, pour un exemple expérimental du chapitre 3.

2.3.3.2 Déconvolution par une méthode itérative, non-négative et aux moindres carrés

Comme justifié en introduction de cette sous-section, les méthodes non-négatives aux moindres carrés et itératives pour la déconvolution du Beamforming-MS sont utilisées dans cette thèse pour inverser indirectement la matrice de réponses d'antenne moyennes. D'après l'état de l'art du paragraphe 2.2.1.2, deux méthodes non-négatives, aux moindres carrés et itératives sont utilisées dans le domaine du bruit de passage : la méthode DAMAS-MS [Fleury 2011, LeCourtois 2012] et SDM [Bruhl 2000]. Dans ce paragraphe, nous présentons les algorithmes de ces deux méthodes et nous comparons leurs performances mathématiques en termes de convergence.

Le problème aux moindres carrés avec une contrainte de non-négativité qui est considéré par DAMAS-MS et SDM se formule de la façon suivante :

$$\begin{cases} \hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f) = \arg \min_{\Gamma_x(\mathbf{x}; f)} \|\Gamma_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f) - |\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_x(\mathbf{x}; f)\|_2^2 \\ \Gamma_x(X_l, f) > 0, \forall l \in [1, L] \end{cases} \quad (2.41)$$

La contrainte sur la positivité des autospectres de sources inconnues permet d'obtenir une solution réaliste.

Méthode de Gauss-Seidel (DAMAS-MS)

La méthode DAMAS-MS, pour *Deconvolution Algorithm for the Mapping of Acoustic Sources for Moving Sources*, est issue de la méthode DAMAS initialement proposée pour la déconvolution de la méthode de formation de voies pour sources fixes dans un contexte aéroacoustique par Brooks *et al.* [Brooks 2006a]. La méthode DAMAS a été étendue pour le cas de sources mobiles par Fleury *et al.* pour le bruit de passage d'avion [Fleury 2011] et par Le

Courtois pour le bruit de passage de train [LeCourtois 2012]. Dans ce paragraphe, nous présentons la méthode DAMAS-MS pour la déconvolution du Beamforming-MS par bloc qui ne prend donc pas en compte la correction de l'effet Doppler comme il l'est réalisé dans les deux variantes de la méthode DAMAS-MS citées précédemment. De plus, pour implémenter notre méthode DAMAS-MS, nous choisissons d'utiliser un algorithme de type Gauss-Seidel comme proposé dans la méthode DAMAS pour sources fixes [Brooks 2006a] et par Le Courtois [LeCourtois 2012].

L'algorithme de Gauss-Seidel consiste à formuler la valeur théorique de l'estimateur de Beamforming-MS par bloc de l'équation (2.40) sans le terme de bruit de mesure de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 \forall l \in [1, L], \Gamma_{\text{BF}}(X_l, f) &= \sum_{l'=1}^L |psf(X_l, X_{l'}, f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_x(X_{l'}, f) \\
 &= |psf(X_l, X_l, f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_x(X_l, f) + \sum_{l' \neq l} |psf(X_l, X_{l'}, f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_x(X_{l'}, f) \\
 &= \Gamma_x(X_l, f) + \sum_{l' \neq l} |psf(X_l, X_{l'}, f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_x(X_{l'}, f)
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

La dernière ligne de l'équation (2.42) est justifiée par le fait que la réponse d'antenne est normalisée, *i.e.* $|psf(X_l, X_l, f)|_{\text{moy}}^2 = 1$. En pratique, les réponses d'antenne moyennes étant construites à partir des hypothèses sur le milieu de propagation, l'autospectre $\hat{\Gamma}_x(X_l, f)$ de la source équivalente au point X_l peut être estimé en connaissant une estimée des autospectres des autres sources équivalentes par l'équation suivante :

$$\hat{\Gamma}_x(X_l, f) = \Gamma_{\text{BF}}(X_l, f) - \sum_{l' \neq l} |psf(X_l, X_{l'}, f)|_{\text{moy}}^2 \Gamma_x(X_{l'}, f) \tag{2.43}$$

Cette équation est à la base de la méthode DAMAS-MS et l'estimation des autospectres des sources équivalentes s'effectuera de façon itérative. La combinaison linéaire de l'équation (2.42) est traduite schématiquement par la figure 2.22.

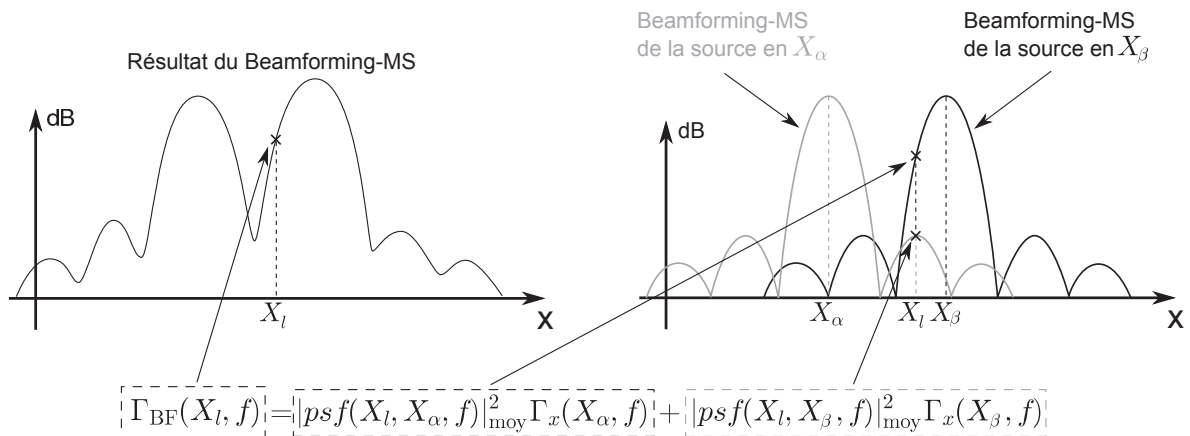


FIGURE 2.22 – Problème considéré par la méthode DAMAS-MS utilisant l'algorithme de Gauss-Seidel de l'équation (2.42).

L'algorithme de la méthode DAMAS-MS est le suivant. Les valeurs des autospectres de sources inconnues sont initialisées, à l'itération zéro notée par l'exposant (0), avec le résultat du Beamforming-MS par bloc :

$$\forall l \in [1, L], \quad \hat{\Gamma}_x(X_l, f)^{(0)} = \Gamma_{\text{BF}}(X_l, f) \quad (2.44)$$

À la \mathfrak{R} -ième itération notée par l'exposant (\mathfrak{R}), les L autospectres de sources équivalentes sont estimés en parcourant les indices l dans l'ordre croissant :

$$l : 1 \rightarrow L, \quad \hat{\Gamma}_x(X_l, f)^{(\mathfrak{R})} = \Gamma_{\text{BF}}(X_l, f) - \sum_{l' \neq l} |psf(X_l, X_{l'}, f)|_{\text{moy}}^2 \hat{\Gamma}_x(X_{l'}, f)^{(\mathfrak{R}-1)} \quad (2.45)$$

Afin de lisser les résultats à la \mathfrak{R} -ième itération, Brooks *et al.* proposent de réaliser une deuxième étape d'estimation des sources en parcourant les indices l dans l'ordre décroissant [Brooks 2006a] :

$$l : L \rightarrow 1, \quad \hat{\Gamma}_x(X_l, f)^{(\mathfrak{R})} = \Gamma_{\text{BF}}(X_l, f) - \sum_{l' \neq l} |psf(X_l, X_{l'}, f)|_{\text{moy}}^2 \hat{\Gamma}_x(X_{l'}, f)^{(\mathfrak{R})} \quad (2.46)$$

À la fin de chaque itération, la contrainte de positivité sur les autospectres des sources estimés est assurée en imposant que toutes les valeurs des autospectres de sources estimées négatives soient nulles. Pour cet algorithme de reconstruction d'autospectres de sources, nous définissons le Beamforming-MS reconstruit comme étant $|\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)|_{\text{moy}}^2 \hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)^{(\mathfrak{R})}$ et l'erreur relative de reconstruction à la \mathfrak{R} -ième itération comme étant :

$$\epsilon_{\text{rel}} = \frac{\|\Gamma_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f) - |\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)|_{\text{moy}}^2 \hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)^{(\mathfrak{R})}\|_2}{\|\Gamma_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f)\|_2} \quad (2.47)$$

avec $\hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)^{(\mathfrak{R})} = [\hat{\Gamma}_x(X_1, f)^{(\mathfrak{R})}, \dots, \hat{\Gamma}_x(X_L, f)^{(\mathfrak{R})}]^T$ le vecteur des autospectres des sources estimés à la \mathfrak{R} -ième itération et $\|\cdot\|_2$ la norme L_2 .

Afin de déterminer un critère d'arrêt des itérations de l'algorithme DAMAS-MS, on considère la configuration de simulation de la table 2.1 avec deux sources de bruit blanc incohérentes, sans bruit de mesure. Pour cette configuration, on calcule la méthode DAMAS-MS pour déconvoluer le Beamforming-MS par bloc sur 2000 itérations. À la fréquence $f = 1500\text{Hz}$ correspondant à une longueur d'onde égale au double de l'espacement intercapteur, l'erreur relative de reconstruction est calculée en fonction des itérations et est représentée sur la figure 2.23a. Au vu de la figure 2.23a, l'erreur relative de reconstruction ne décroît pas de façon monotone, elle atteint un minimum global pour l'itération 213 puis oscille autour de 10,96% jusqu'à l'itération 2000. Cette évolution de l'erreur relative de reconstruction est identique sur toute la bande $[500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$. Dans la littérature, les auteurs arrêtent l'algorithme DAMAS-MS au bout d'un nombre maximal d'itérations [LeCourtois 2012] ou lorsque le Laplacien de la solution a convergé [Fleury 2011]. Pour fixer un critère d'arrêt de DAMAS-MS, nous fixons donc le nombre maximal d'itérations à 2000 ce qui est suffisant pour que l'erreur de reconstruction se stabilise. Le résultat de DAMAS-MS atteignant le minimum global de l'erreur de reconstruction sur les 2000 itérations est conservé. Sur l'exemple de la figure 2.23a à la fréquence 1500Hz, le résultat de DAMAS-MS pour l'itération 213 est

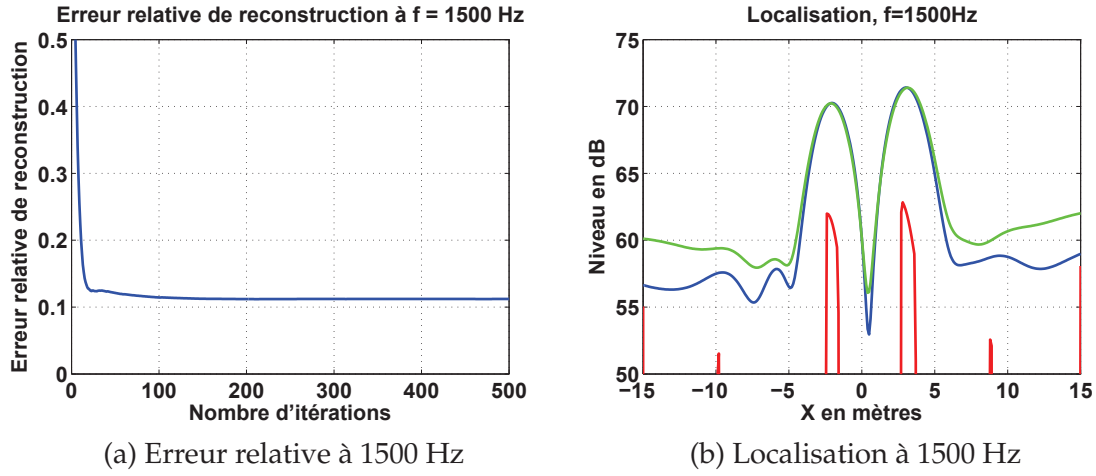


FIGURE 2.23 – Simulation avec deux sources incohérentes sans bruit de mesure. À gauche, l’erreur relative de reconstruction évaluée pour 2000 itérations et affichée que pour les 500 premières itérations. À droite, localisation de sources par Beamforming-MS (—), par DAMAS-MS avec 213 itérations (—) et Beamforming-MS reconstruit à partir du résultat de DAMAS-MS (—).

donc conservé selon ce critère d’arrêt. Le résultat du Beamforming-MS par bloc est représenté en bleu sur la figure 2.23b. Au vu de la localisation des sources par DAMAS-MS (213 itérations) représentée en rouge sur la figure 2.23b, la dynamique de localisation de DAMAS-MS est de 5dB, à cause des effets de bords tout juste visibles qui génèrent des sources non physiques. De plus, le Beamforming-MS reconstruit à partir du résultat de DAMAS-MS, représenté en vert sur la figure 2.23b, montre que les lobes principaux de localisation sont bien reconstruits mais que les lobes secondaires sont mal reconstruits.

Méthode de gradient projeté (SDM)

Un autre algorithme classique pour résoudre un problème aux moindres carrés avec une contrainte de positivité de façon itérative est la méthode de gradient projetée. Cette méthode mathématique a été proposée pour résoudre le problème de déconvolution de la formation de voies pour sources mobiles par Bruhl [Bruhl 2000] et a été appelée SDM, pour *Source Density Modelling*. Dans ce paragraphe, nous présentons la méthode SDM adaptée pour la déconvolution du Beamforming-MS par bloc qui ne prend donc pas en compte la correction de l’effet Doppler comme il l’est réalisé dans l’article de Bruhl [Bruhl 2000].

L’algorithme de la méthode SDM est le suivant. Les valeurs des autospectres de sources inconnues sont initialisées avec le résultat du Beamforming-MS par bloc :

$$\forall l \in [1, L], \quad \hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)^{(0)} = \Gamma_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f) \quad (2.48)$$

À la \mathcal{R} -ième itération, les L autospectres de sources équivalentes sont estimés par l'équation :

$$\hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)^{(\mathcal{R})} = \hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)^{(\mathcal{R}-1)} + 2\chi |\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)|_{\text{moy}}^{2H} \left(\hat{\Gamma}_{\text{BF}}(\mathbf{x}; f) - |\mathbf{PSF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; f)|_{\text{moy}}^2 \hat{\Gamma}_x(\mathbf{x}; f)^{(\mathcal{R}-1)} \right) \quad (2.49)$$

avec χ le paramètre réglant la descente du gradient. χ résulte d'un compromis entre convergence et vitesse de convergence :

- si χ est trop grand, le minimum global peut être dépassé et la solution peut diverger,
- si χ est trop faible, la vitesse de convergence est très lente

La valeur de χ est choisie constante et égale à 10^{-4} à chaque itération dans ce manuscrit, ce choix est justifié par les observations suivantes :

- pour des valeurs $\chi = 10^{-2}$, l'algorithme diverge sur $[500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$
- pour des valeurs $\chi = 10^{-3}$, l'algorithme diverge sur $[500\text{Hz}; 1150\text{Hz}]$
- pour des valeurs $\chi \leq 10^{-4}$, l'algorithme converge sur $[500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$

À la fin de chaque itération, la contrainte de positivité sur les autospectres des sources estimés est assurée en imposant que toutes les valeurs des autospectres de sources estimées négatives soient nulles.

Afin de déterminer un critère d'arrêt des itérations de l'algorithme SDM, la même simulation est réalisée que pour la méthode DAMAS-MS dans le paragraphe précédent. L'erreur relative de reconstruction de la méthode SDM est évaluée pour 2000 itérations à la fréquence 1500 Hz et est représentée sur la figure 2.24a. À cette même fréquence et sur la figure 2.24b, le résultat du Beamforming-MS par bloc est représenté en bleu, le résultat de SDM pour 102 itérations est représenté en rouge et le Beamforming-MS reconstruit à partir du résultat de SDM est représenté en vert. Au vu de la figure 2.24a, l'erreur relative de reconstruction

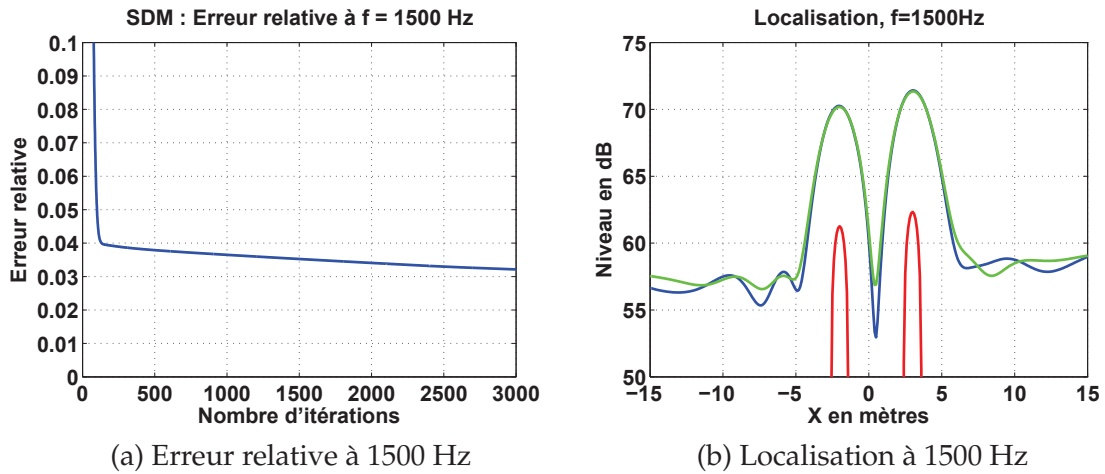


FIGURE 2.24 – Simulation avec deux sources incohérentes sans bruit de mesure. À gauche, erreur relative de reconstruction évaluée pour 2000 itérations. À droite, localisation de sources par Beamforming-MS (—), par SDM avec 102 itérations (—) et Beamforming-MS reconstruit à partir du résultat de SDM (—).

décroît de façon strictement monotone au cours des 2000 itérations avec une décroissance beaucoup plus lente aux environs de l'itération 150. Cette évolution de l'erreur relative de

reconstruction est identique sur toute la bande $[500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$. Pour fixer un critère d'arrêt de SDM, nous fixons donc le nombre maximal d'itérations à 2000 ce qui est suffisant pour que l'erreur de reconstruction soit de l'ordre de quelques pourcents et l'algorithme est arrêté lorsque la variation de l'erreur relative de reconstruction varie de moins de 0,1% entre deux itérations successives, ce qui correspond à l'itération pour lequel la convergence ralentit fortement. À la dernière itération de l'algorithme, l'algorithme de la méthode SDM a convergé car ses résultats sont stables et ne varient plus pour des nombres d'itérations plus élevés. Avec ce critère d'arrêt, la méthode SDM s'arrête au bout de 102 itérations à la fréquence $f = 1500\text{Hz}$ et l'erreur relative de reconstruction pour ce nombre d'itérations est d'environ 4%.

La dynamique de localisation de la méthode SDM est infinie dans ce cas sans bruit de mesure, la réponse d'antenne moyenne a donc été correctement supprimée des résultats de Beamforming-MS. La bonne déconvolution par SDM se constate également par le faible écart entre le Beamforming-MS par bloc représenté en bleu et le Beamforming-MS reconstruit à partir du résultat de SDM représenté en vert, sur la figure 2.24b. Les lobes principaux de Beamforming-MS sont correctement reconstruits mais il existe des erreurs d'au plus 1 dB dans la reconstruction des lobes secondaires.

Choix de la méthode SDM pour la déconvolution du Beamforming-MS par bloc

Dans la configuration expérimentale choisie pour cette étude (voir paragraphe 1.4.2.1), la simulation d'un cas idéal de deux sources sans bruit de mesure a montré que la méthode SDM converge rapidement et atteint une erreur relative de reconstruction de 4% et que la méthode DAMAS-MS converge vers une erreur relative de reconstruction de l'ordre de 11%.

De plus, une comparaison des Beamforming-MS reconstruits à partir des résultats de DAMAS-MS (en vert, fig. 2.23b) et SDM (en vert, fig. 2.24b) confirme la conclusion que la méthode SDM permet une meilleure reconstruction du Beamforming-MS par bloc. En comparant les résultats de DAMAS-MS (en rouge, fig. 2.23b) et SDM (en rouge, fig. 2.24b), la méthode SDM permet d'éliminer totalement la réponse d'antenne moyenne des résultats de Beamforming-MS ce qui n'est pas le cas de DAMAS-MS qui possède une dynamique de localisation de 10dB. En effet, la méthode DAMAS-MS reconstruit de l'énergie sur les extrémités de la grille de calcul. Cette énergie non désirée et reconstruite par la méthode DAMAS-MS est intuitivement prévisible. En effet, cela est lié au fait que la méthode DAMAS-MS déconvolue la réponse d'antenne moyenne point par point en débutant par les extrémités de la grille de calcul comme le montrent les équations (2.45) et (2.46). Cet artefact de reconstruction n'existe pas pour la méthode SDM qui déconvolue sur la totalité de la grille de calcul à chaque itération.

Pour toutes ces raisons, nous choisissons la méthode SDM pour la déconvolution du Beamforming-MS par bloc dans cette thèse.

2.3.4 Performances des méthodes de déconvolution de la formation de voies pour sources mobiles

Cette sous-section présente une étude de la méthode SDM pour la déconvolution du Beamforming-MS en termes de performances de localisation de sources et de contribution de sources.

Les performances de localisation considérées sont :

- la fréquence de travail minimale pour laquelle deux sources proches ne sont pas localisées
- la dynamique de localisation définie comme étant la différence en decibels entre le maximum du lobe de localisation de la source la moins énergétique et le maximum du lobe de localisation des sources non physiques

Les performances de contribution de sources sont évaluées en termes :

- d'estimation de l'autospectre des sources
- des niveaux des spectres associés aux sources équivalentes non physiques identifiées par déconvolution. L'énergie reconstruite associée à des sources non physiques doit être la plus faible possible.

Une méthode de contribution de sources performante est donc une méthode qui va permettre d'estimer la contribution de chacune des sources quantitativement et d'éliminer la contribution non désirée des autres sources à cette estimée.

Les méthodes de déconvolution des résultats de formation de voies sont généralement très sensibles à la connaissance du modèle de propagation puisqu'elles utilisent cette connaissance pour estimer les autospectres inconnus des sources. Dans ce qui suit, nous étudions donc l'influence sur les résultats de déconvolution de la non-vérification de l'hypothèse de déplacement de sources négligeable durant un bloc temporel de durée T . Ensuite, nous étudierons l'effet du niveau de bruit de mesure sur les résultats de déconvolution en termes de localisation et de contribution. Ces deux erreurs ont été choisies car elles génèrent des sources non physiques dans les résultats de déconvolution qui diminuent ainsi la dynamique de localisation.

2.3.4.1 Erreur due à la non-vérification de l'hypothèse de déplacement de sources négligeable

Dans le cas sans bruit de mesure, l'erreur due à la non-vérification de l'hypothèse de déplacement de sources négligeable est mathématiquement la différence entre l'estimateur du Beamforming-MS par bloc exprimé au point $X_l, l \in [1, L]$ par l'équation (2.21) et sa valeur théorique exprimée au point $X_l, l \in [1, L]$ par l'équation (2.33). Nous étudions donc dans ce paragraphe une erreur de modélisation de l'estimateur de Beamforming-MS par bloc.

La configuration expérimentale dont les paramètres sont définis dans la table 2.1 est la configuration de simulation utilisée dans cette étude. La figure 2.25 compare le résultat du Beamforming-MS par bloc à $f = 1500\text{Hz}$ en bleu d'une source de vitesse $v = 2\text{m.s}^{-1}$ localisée

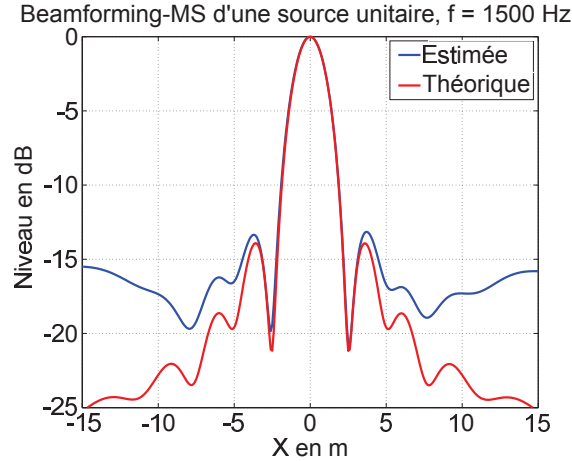


FIGURE 2.25 – Simulation d’une source de vitesse $v = 2\text{ m.s}^{-1}$ sans bruit de mesure. Localisation par Beamforming-MS par bloc d’une source de vitesse $v = 2\text{ m.s}^{-1}$ (—) et sa valeur théorique supposant que le déplacement des sources est négligeable durant T (—), à la fréquence $f = 1500\text{ Hz}$.

au centre de la grille de calcul et sa valeur théorique pour cette configuration en rouge si l’hypothèse de déplacement négligeable est vérifiée. Cette figure montre que le lobe principal de localisation du Beamforming-MS par bloc est conforme à sa valeur théorique. Cela se justifie par le fait que la résolution du Beamforming-MS par bloc est supérieure à 1,5 mètres sur $[500\text{ Hz}; 2000\text{ Hz}]$ (fig. 2.12a), le déplacement des sources de 20 centimètres durant $T = 100\text{ ms}$ est donc faible devant la largeur du lobe principal de localisation du Beamforming-MS. En revanche, une importante erreur est commise sur la structure des lobes secondaires, les lobes secondaires de la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc (fig. 2.25, en rouge) ne sont pas représentatifs de ceux du résultat du Beamforming-MS (fig. 2.25, en bleu).

Les conséquences de cette mauvaise connaissance *a priori* de la structure des lobes secondaires de la réponse d’antenne moyenne sur les résultats des méthodes de déconvolution sont visibles en considérant les figures 2.23b et 2.24b présentées précédemment. Dans ces figures, nous nous intéressons aux Beamforming-MS par bloc reconstruits à partir des résultats de déconvolution représentés en vert et aux résultats de Beamforming-MS représentés en bleu. Les deux méthodes de déconvolution reconstruisent bien le lobe principal du Beamforming-MS mais ne reconstruisent pas correctement les lobes secondaires du résultat du Beamforming-MS. Ces observations sont conformes aux analyses de la figure 2.25. La mauvaise reconstruction des lobes secondaires ne dégrade pas le résultat de la méthode SDM (fig. 2.24b). En revanche, sans considérer les localisations aux extrémités de la grille de calcul, la mauvaise reconstruction des lobes secondaires génère des sources non physiques qui induisent une dynamique de localisation par DAMAS-MS de 10 dB (fig. 2.23b).

La méthode SDM fournit donc une bonne déconvolution du Beamforming-MS au vu de ces performances en localisation et elle s’avère plus robuste que DAMAS-MS vis-à-vis de ces erreurs de modélisation de la valeur théorique du Beamforming-MS au vu de la quantité de

sources non physiques.

2.3.4.2 Performances pour deux sources incohérentes et du bruit de mesure

Les résultats de déconvolution du Beamforming-MS par SDM sont d'abord calculés, sur toute la bande fréquentielle de travail, pour les deux résultats de Beamforming-MS de la figure 2.17. Ces résultats correspondent à un cas de deux sources de bruit blanc incohérentes et de même niveau en l'absence de bruit de mesure et un RSB de 5 dB. L'effet du bruit de mesure est ensuite étudié de façon plus globale, sur une fréquence, en considérant plusieurs valeurs de rapport signal sur bruit comme il l'a été effectué pour l'étude des performances du Beamforming-MS (fig. 2.18b). Dans ce qui suit, nous étudions d'abord les performances en localisation de sources puis nous étudions les performances en contribution de sources.

Localisation de sources

Les résultats de localisation de sources obtenus par la méthode SDM sont présentés dans le plan distance-fréquence sur la figure 2.26, la sous-figure 2.26a représente le cas sans bruit de mesure et la sous-figure 2.26b représente le cas avec un RSB de 5dB.

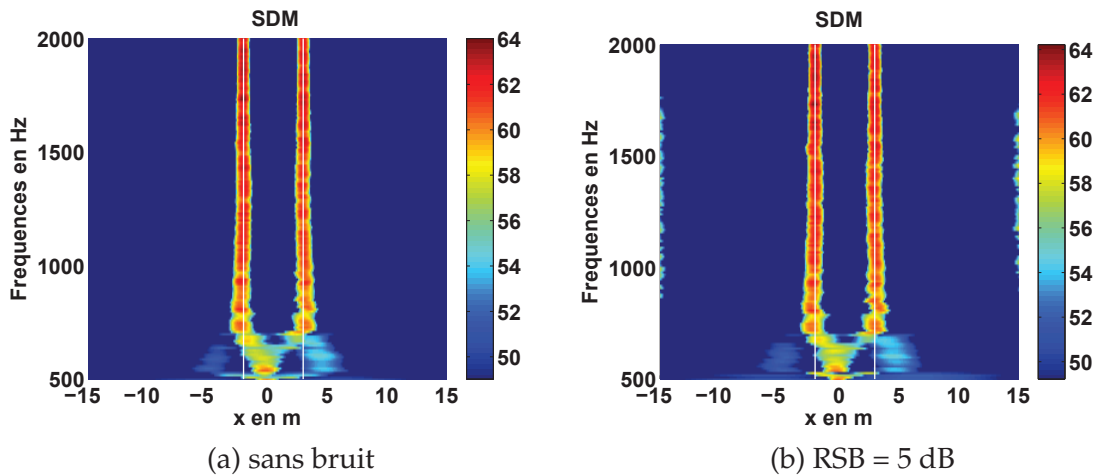


FIGURE 2.26 – Simulation de deux sources blanches incohérentes : Localisation de sources par SDM dans le plan distance-fréquence sans bruit de mesure (a) et avec un bruit de mesure associé à $RSB = 5dB$ (b). Les positions théoriques des sources sont représentées par des lignes verticales blanches.

La figure 2.26 montre que la méthode SDM localise les deux sources dans les deux cas pour des fréquences supérieures à $f = 700Hz$. La déconvolution par la méthode SDM permet donc d'améliorer les capacités de localisation de sources en basse fréquence car le Beamforming-MS par bloc localise les deux sources avec une résolution suffisante pour des fréquences supérieures à environ 900 Hz (fig. 2.17). Enfin, pour la simulation avec un RSB

de 5 dB (fig. 2.26b), on constate que le résultat de déconvolution localise de l'énergie sur les extrémités de la grille de calcul sur $[900\text{Hz}; 1800\text{Hz}]$ ce qui correspond à la limite de la dynamique de localisation du Beamforming-MS.

La sous-figure 2.27a rappelle la localisation par Beamforming-MS et la sous-figure 2.27b représente la localisation estimée par la méthode SDM, à la fréquence $f = 1500\text{Hz}$ pour une simulation sans bruit de mesure (en rouge), avec $RSB = 10\text{dB}$ (en noir), avec $RSB = 5\text{dB}$ (en vert) et avec $RSB = 0\text{dB}$ (en bleu).

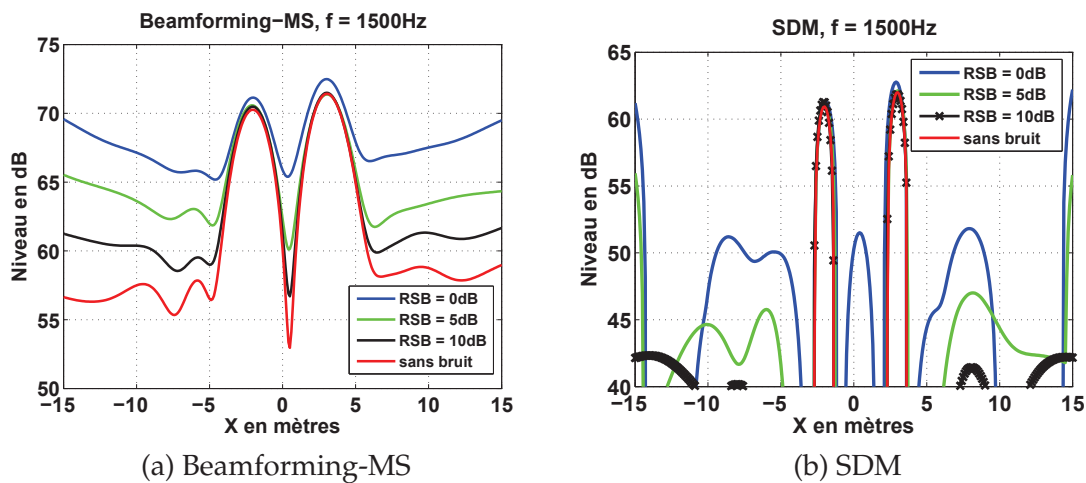


FIGURE 2.27 – Simulation de deux sources blanches incohérentes avec différents niveaux de bruit de mesure : sans bruit de mesure (—), avec $RSB = 10\text{dB}$ (en noir), avec $RSB = 5\text{dB}$ (—) et avec $RSB = 0\text{dB}$ (—). À $f = 1500\text{Hz}$, les localisations des deux sources estimées par Beamforming-MS par bloc (a) et après déconvolution par la méthode SDM (b)

Au vu de ces sous-figures, on constate que les localisations estimées des sources par SDM sont correctes ce qui était déjà le cas pour le Beamforming-MS par bloc sur la figure 2.27a. De plus, la dynamique de localisation après déconvolution par SDM est égale à la valeur du RSB en présence de bruit de mesure. D'après la figure 2.27b, la dynamique de localisation des résultats de déconvolution est meilleure que la dynamique de localisation des résultats de Beamforming-MS par bloc (fig. 2.18b) mais elle diminue également de 5 dB à chaque fois que le niveau de bruit de mesure est augmenté de 5 dB. Pour des valeurs de RSB de 5 dB et 0 dB, la dynamique de localisation après déconvolution est très dégradée par les effets de bords.

En conclusion, le bruit de mesure dégrade donc la dynamique de localisation de la méthode SDM et augmente la quantité de sources non physiques sur toute la bande fréquentielle. De plus, en éliminant la réponse d'antenne moyenne des résultats du Beamforming-MS par bloc, la méthode SDM permet d'améliorer la résolution de deux sources spatialement proches en basse fréquence.

Contribution de sources

Afin d'évaluer les performances de la méthode SDM en estimation de contribution de sources, nous définissons des zones d'intégration spatiale :

- Zone $Z_1 = [-3m; -1m]$ associée à la source S_1
- Zone $Z_2 = [2m; 4m]$ associée à la source S_2
- Zone $[-15m; -3m] \cup [-1m; 2m] \cup [4m; 15m]$ associée aux sources non physiques qui sont localisées après déconvolution

Sur la figure 2.28a, on représente plusieurs spectres de contribution calculés sur les zones précédemment définies et l'autospectre réel des sources pour un cas sans bruit de mesure et pour un cas avec un RSB de 5dB sur la figure 2.28b :

- la contribution estimée de la source S_1 associée à la zone Z_1 , en rouge
- la contribution estimée de la source S_2 associée à la zone Z_2 , en vert
- la contribution estimée des sources non physiques, en noir
- l'autospectre réel des sources en tirets bleus

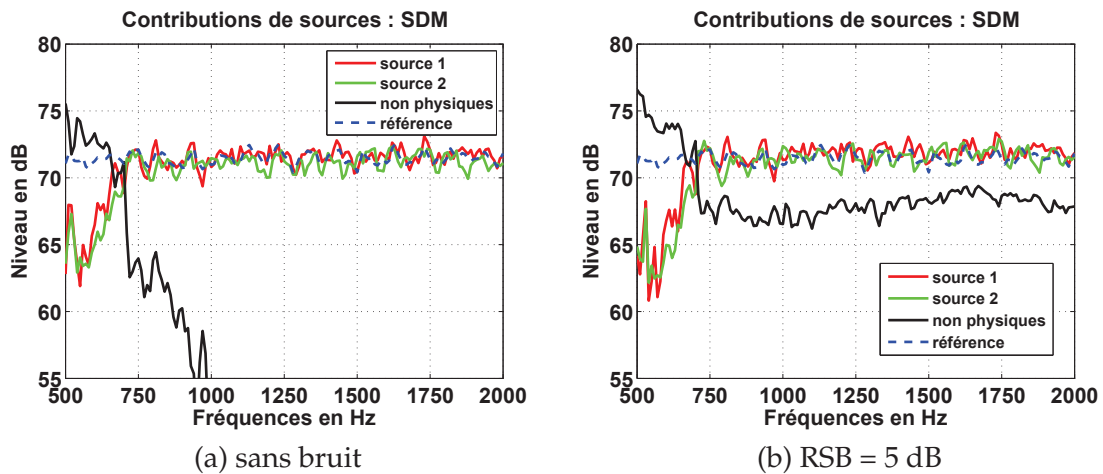


FIGURE 2.28 – Simulation de deux sources blanches incohérentes : spectres de contribution par DAMAS-MS sans bruit de mesure (a) et avec un bruit de mesure associé à $RSB = 5dB$ (b). Spectres de contribution des zones Z_1 et Z_2 et de la zone des sources non physiques.

Dans les deux cas, les spectres des sources sont bien reconstruits pour des fréquences supérieures à 700 Hz et sont sous-estimés de plusieurs decibels en-dessous de 700 Hz, jusqu'à -8 dB à 500 Hz. Cela se justifie par le fait qu'en dessous de 700 Hz la méthode SDM ne parvient pas à localiser les deux sources (fig. 2.26). D'après la figure 2.28a, au-dessus de 700 Hz, la contribution des sources non physiques est faible par rapport à la contribution des sources en l'absence de bruit de mesure, ce qui signifie que la déconvolution a éliminé correctement les réponses d'antenne moyennes. Comme il l'a été observé sur la figure 2.26b, le bruit de mesure génère des sources non physiques sur toute la bande fréquentielle dans les résultats de localisation de sources après déconvolution. D'après la figure 2.28b, cet effet du bruit de mesure se traduit par une augmentation des contributions des sources non physiques estimées par la méthode SDM sur toute la bande fréquentielle. Pour un RSB de 5dB (fig. 2.28b), on constate que la différence en decibels entre l'autospectre réel des sources et la contribution des sources non physiques est égale au RSB. En termes de sources non

physiques, pour les fréquences inférieures à 700 Hz pour lesquelles les deux sources ne sont pas localisées, la contribution des sources non physiques est plus élevée que l'autospectre réel des sources, jusqu'à 5 dB à 500 Hz.

La figure 2.29 représente la contribution estimée des sources non physiques pour une simulation sans bruit de mesure (en rouge), avec $RSB = 10\text{dB}$ (en noir), avec $RSB = 5\text{dB}$ (en vert) et avec $RSB = 0\text{dB}$ (en bleu).

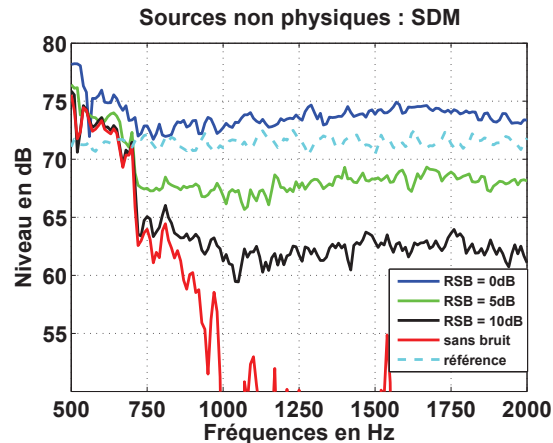


FIGURE 2.29 – Spectres de contribution estimés par SDM sans bruit de mesure (—), avec $RSB = 10\text{dB}$ (—), avec $RSB = 5\text{dB}$ (—) et avec $RSB = 0\text{dB}$ (—). L'autospectre réel des sources est représenté en tirets cyan (—).

Quel que soit le niveau de bruit de mesure, la contribution des sources non physiques est plus élevée que le niveau de l'autospectre réel de la source S_1 en dessous de 700 Hz car les sources en S_1 et S_2 ne sont pas localisées. De plus, la différence entre l'autospectre réel des sources et la contribution des sources non physiques est égale au RSB, pour les fréquences supérieures à 700 Hz et les RSB égaux à 5 dB et 10 dB. Pour la simulation avec un RSB de 0 dB, la contribution des sources non physiques est plus importante que l'autospectre réel des sources sur toute la bande fréquentielle. Cela est dû à l'énergie reconstruite sur les extrémités de la grille de calcul qui est très importante et que l'on observe sur le résultat à 1500 Hz de la sous-figure 2.27b.

En conclusion, l'augmentation du niveau du bruit de mesure implique une augmentation de l'énergie attribuée à des sources non physiques par la déconvolution. L'augmentation de la quantité de sources non physiques localisées après déconvolution et l'augmentation de leur énergie est problématique pour l'interprétation des résultats de déconvolution. En effet, d'après la figure 2.27b et 2.29, les résultats de déconvolution amènent à la conclusion que des sources secondaires très énergétiques existent en différents points de calcul et sur les extrémités de la grille de calcul. Les effets de bord perturbent donc fortement l'interprétation des résultats de déconvolution.

2.3.5 Étude d'une configuration réaliste : Validation du choix de la méthode initiale pour cette étude

Cette sous-section présente une application de la méthode initiale sur des données issues de la simulation réaliste proposée dans la section 1.5. Cette étude a pour objectif de valider le choix de la méthode initiale pour l'étude du bruit de passage d'un navire de surface. Pour rappel, dans le référentiel de la grille de calcul, la source large bande de propulseur a pour coordonnées $S_2(-6m; 0m; 0m)$ et le point d'excitation de la plaque vibrante a pour coordonnées $S_1(2m; 0m; 0m)$. Un bruit de mesure blanc a été ajouté au niveau des hydrophones tel que le rapport signal sur bruit soit de 15 dB, ce qui est une valeur réaliste d'une expérience de bruit de passage de navire de surface seul.

La figure 2.30a présente les résultats de localisation obtenus par Beamforming-MS par bloc dans le plan distance-fréquence $[-15m; +15m] \times [500Hz; 2000Hz]$ et la figure 2.30b présente les résultats de déconvolution du Beamforming-MS obtenus par la méthode SDM dans le plan distance-fréquence $[-15m; +15m] \times [500Hz; 2000Hz]$.

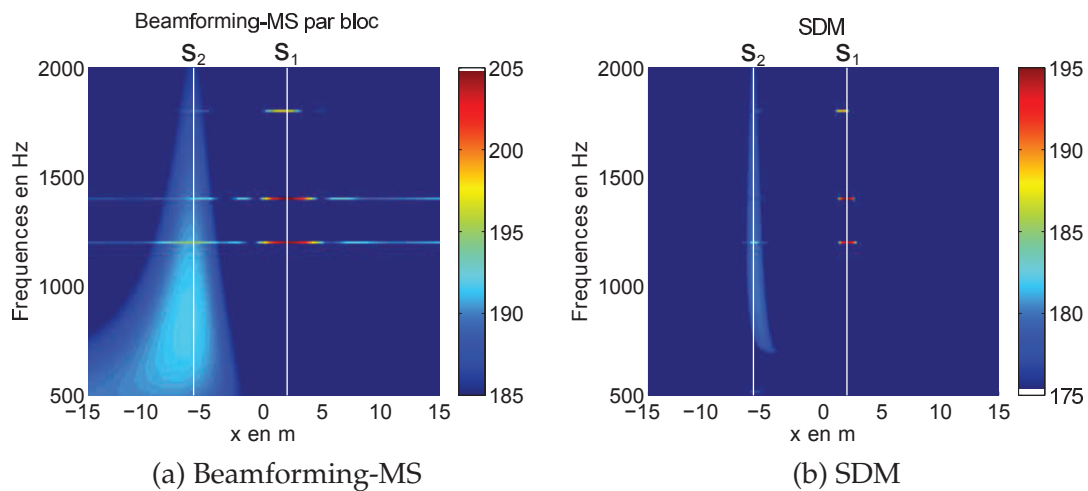


FIGURE 2.30 – Résultats de localisation par Beamforming-MS par bloc (a) et après déconvolution par SDM (b) pour la simulation de la configuration réaliste d'un navire de surface au passage. Les positions théoriques des sources sont représentées par des lignes verticales blanches.

Au vu des résultats de localisation de la figure 2.30, les deux sources sont correctement localisées par les deux méthodes de traitement d'antenne et la résolution est suffisante pour localiser les sources sur toute la bande fréquentielle de travail. Le décalage de localisation de la source S_1 de quelques centimètres à la fréquence 1800 Hz se justifie par la nature vibroacoustique de la source. En effet, dans une étude sur des simulations qui n'est pas rapportée ici, il a été montré que la localisation estimée par Beamforming-MS de l'excitation d'une plaque vibrante par une force ponctuelle d'amplitude spectralement blanche variait en fonction de la fréquence autour de la position du point d'excitation.

Afin d'évaluer les performances de contribution de sources de la méthode SDM pour cette simulation réaliste, des zones de contribution sont définies au vu des résultats de localisation précédents :

- Zone correspondant à S_2 : $[-8m; -4m]$
- Zone correspondant à S_1 : $[0m; 4m]$
- Zone correspondant aux sources non désirées : $[-15m; -8m] \cup [-4m; +0m] \cup [+4m; 15m]$

La figure 2.31 représente les spectres :

- de la contribution estimée de la source S_1 en bleu,
- de l'amplitude théorique de la source S_1 en tirets violets qui est calculée par les équations (1.2) et (1.24),
- de la contribution estimée de la source S_2 en rouge,
- de l'amplitude théorique de la source S_2 en tirets cyans,
- de la contribution estimée des sources non physiques en noir.

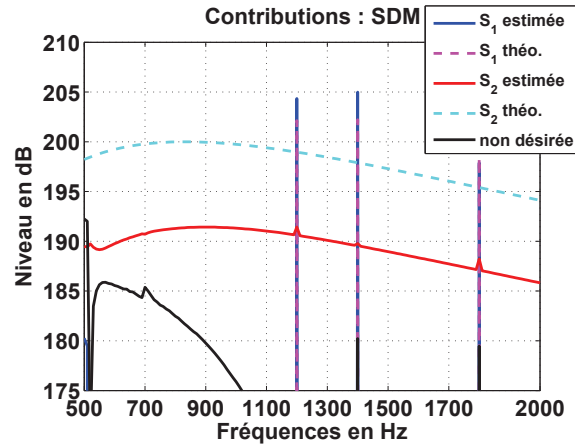


FIGURE 2.31 – Simulation de la configuration réaliste d'un navire de surface au passage : Estimation des contributions par la méthode SDM. Contribution estimée de la source S_1 en bleu, amplitude théorique de la source S_1 en tirets cyans, contribution estimée de la source S_2 en rouge, amplitude théorique de la source S_2 en tirets violets et contribution estimée des sources non physiques en noir.

Au vu de la figure 2.31, la contribution des sources non physiques est inférieure aux contributions des sources physiques de plus de 5 dB pour des fréquences supérieures à 700 Hz. Cela atteste du fait que la déconvolution par la méthode SDM s'est réalisée correctement.

La contribution de la source S_1 est bien estimée par la méthode SDM (fig. 2.31, en bleu) puisque son autospectre ne contient de l'énergie qu'aux fréquences des trois sinus de la source théorique (fig. 2.31, en tirets violets). L'autospectre de la source S_1 est cependant sur-estimé d'environ 2 dB aux fréquences 1200 Hz et 1400 Hz.

La contribution de la source S_2 est relativement bien estimée. En effet, le spectre de la contribution estimée par S_2 est maximal pour la fréquence 900 Hz et possède un gabarit en forme de bosse de bruit avec une même valeur de décroissance sur la bande $[900\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$.

En revanche, la valeur de la pente est légèrement mal estimée pour les fréquences inférieures à 900 Hz avec un écart d'environ 4 dB par décade. De plus, on constate que le niveau absolu de la source S_2 est mal estimé à cause de la directivité dipolaire de la source qui n'est pas prise en compte par la méthode de Beamforming-MS.

En conclusion, la faisabilité de la méthode initiale pour l'étude du bruit de passage de navire de surface est donc validée au travers de cette simulation réaliste de navire de surface. Cette simulation réaliste est un cas idéal car les mesures de bruit de passage de navire sont, en pratique, affectées par des erreurs de trajectographie et du bruit de mesure qui dégradent la dynamique de localisation. De plus, la résolution limitée en basses fréquences du Beamforming-MS dégrade l'estimation de la contribution des sources comme il l'a été montré pour la contribution de la source S_2 sur la figure 2.31. Des améliorations doivent donc être apportées sur la méthode initiale concernant la résolution en basses fréquences et les possibles erreurs de trajectographie.

2.3.6 Conclusions

Cette section a présenté la méthode initiale d'imagerie acoustique de navire au passage consistant en :

1. une étape de calcul de l'estimateur du Beamforming-MS permettant la localisation des sources
2. une étape de calcul de déconvolution du Beamforming-MS par la méthode SDM permettant l'estimation de la contribution des sources et l'amélioration des performances de localisation de sources

Sous certaines hypothèses, l'estimateur de Beamforming-MS par bloc peut être exprimé théoriquement en fonction des autospectres des sources inconnues sous la forme d'un problème matricielle linéaire. Les méthodes de déconvolution consistent à estimer ensuite les autospectres des sources inconnues par inversion de ce problème linéaire.

Trois performances de localisation de sources du Beamforming-MS ont été étudiées : l'erreur de localisation, la résolution et la dynamique. Une étude de ces performances a été réalisée au travers des performances de la réponse d'antenne moyenne. Cette étude a montré que ces performances étaient peu sensibles aux faibles erreurs de modèle de propagation telles que l'erreur de célérité et l'erreur de positionnement des capteurs. Des erreurs de calibration des capteurs de l'antenne induisent quant à eux une dégradation de la dynamique et influencent la localisation et la résolution de façon négligeable. Une étude des performances du Beamforming-MS sur des cas de deux sources incohérentes avec du bruit blanc de mesure pour différentes valeurs de RSB a montré que le bruit de mesure n'affecte pas les lobes principaux de localisation mais diminue la dynamique du résultat de localisation. De plus, la cohérence des sources n'influe pas sur la localisation des sources. Pour la configuration expérimentale visée de bruit de passage de navire de surface, la grille de calcul utilisée pour le calcul du Beamforming-MS est grande par rapport à la distance de mesure. Des effets de bords existent donc dans les résultats de Beamforming-MS qui dégradent la dynamique

de localisation. Enfin, du fait de la présence de la réponse d'antenne dans les résultats de Beamforming-MS, la localisation de deux sources proches n'est pas possible en basses fréquences.

Il a été montré que l'étape de déconvolution du Beamforming-MS permet d'éliminer la réponse d'antenne moyenne ce qui améliore la dynamique de localisation et la résolution de deux sources proches en basses fréquences. Une étude comparative a montré que la méthode SDM présentait de meilleures propriétés de convergence et reconstruisait moins de sources non physiques que la méthode DAMAS-MS. De plus, le bruit de mesure et les effets de bords dégradent la dynamique de localisation des résultats de SDM. Le principal intérêt de la déconvolution des résultats du Beamforming-MS est d'accéder à l'estimation de la contribution des sources. Les simulations ont montré que l'estimation de la contribution des sources était dégradée en basses fréquences par la mauvaise résolution du Beamforming-MS. De plus, le bruit de mesure et les effets de bords augmentent la contribution énergétique des sources non physiques qui peuvent dominer la contribution des sources physiques en basses fréquences.

Enfin, l'application de la méthode initiale à la simulation d'une configuration réaliste de navire de surface a montré la faisabilité de cette méthode pour l'estimation de la localisation et de la contribution des sources.

2.4 Améliorations de la localisation et de la contribution de sources mobiles

Cette section aborde maintenant les méthodes développées dans cette thèse pour améliorer les performances de localisation et de contribution de sources de la méthode initiale.

2.4.1 Propositions d'améliorations de la méthode initiale

Comme il l'a été montré dans la section précédente, des effets de bords liés à l'usage d'une grille de calcul grande par rapport à la distance de mesures existent. Ils dégradent la dynamique de localisation et augmentent l'énergie des sources non physiques reconstruites après déconvolution.

Des limitations spécifiques à une mesure de bruit de passage existent et dégradent les performances en localisation du Beamforming-MS. Elles sont liées à deux problèmes pratiques : les erreurs de trajectographie et la présence de sources en basses fréquences. Dans le contexte de la Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin [Directive 2008], les préconisations de surveillance de niveaux de pression acoustique rayonnés concernent les basses fréquences qui sont essentiellement dominées par ces sources tonales. De façon plus générale, la signature acoustique des véhicules motorisés étudiés dans les mesures de bruit de passage présentent de fortes énergies dans les basses fréquences. Une résolution limitée

pour cette gamme de fréquences est donc problématique pour fournir un diagnostic en localisation de sources et contribution de sources.

De plus, les erreurs de trajectographie existent en pratique car la mise en place d'un système de trajectographie précise du véhicule est coûteuse. Ces erreurs seront mises en évidence dans la suite de ce manuscrit. Ces erreurs affectent la localisation des sources en réduisant la dynamique des résultats ce qui peut conduire à l'apparition de sources non physiques menant parfois à un diagnostic erroné. Dans certains cas, les erreurs de trajectographie affectent également la résolution et introduisent des erreurs de localisation.

Nous proposons donc dans cette thèse trois améliorations de la méthode initiale pour pallier ces limitations qui sont :

- un nouveau terme de pondération du Beamforming-MS,
- un traitement de synthèse d'ouverture d'antenne pour des sources tonales qui est particulièrement utile en basses fréquences,
- un algorithme de correction acoustique de trajectographie.

Ces trois améliorations sont algorithmiques et améliorent les performances en localisation de la méthode initiale qui sont l'erreur de localisation, la résolution et la dynamique.

Dans cette section, une nouvelle stratégie de pondération du Beamforming-MS inspirée de la littérature est d'abord présentée pour améliorer la dynamique de localisation en éliminant les effets de bords dus à l'usage d'une grande grille de calcul. Elle améliore la déconvolution des résultats de Beamforming-MS en réduisant la quantité de sources non physiques.

Puis, une amélioration algorithmique est proposée pour améliorer la résolution de la localisation de sources en basses fréquences. Cette amélioration est un traitement passif de synthèse d'ouverture permettant d'agrandir synthétiquement l'antenne en exploitant le mouvement relatif entre le navire et l'antenne. Ce traitement est uniquement applicable aux signaux sources de longueur de corrélation temporelle grande telles que les sources tonales.

Enfin, de faibles erreurs de trajectographie existent dans les mesures de bruit de passage. L'effet des erreurs de trajectographie est mis en évidence sur les performances du traitement de synthèse d'ouverture et sur les résultats de localisation de sources. Un algorithme de correction acoustique de trajectoire est proposée afin d'estimer les erreurs de trajectoire, il permet d'améliorer les performances des méthodes de traitement d'antenne.

2.4.2 Pondération du Beamforming-MS

La sous-section 2.3.2 a mis en évidence l'existence d'effets de bords dans les résultats de Beamforming-MS lorsque les distances entre les points de calcul et l'antenne sont très différentes en fonction du point de calcul, *i.e.* la largeur de la grille de calcul est grande par rapport à la distance de mesure D (fig. 2.20). Ces effets se comprennent physiquement par le fait que les résultats du Beamforming-MS sont des estimations d'amplitudes de sources équivalentes positionnées aux points $X_l, \forall l \in [1, L]$. Ces amplitudes correspondent aux niveaux de pression acoustique qu'une source ponctuelle monopolaire génère à un mètre. Ainsi, les extrémités du calcul sont "vues" par l'antenne à une distance très différente des points de

calcul au centre de la grille de calcul (fig. 2.20), leur amplification par la pondération $w_l(t)$ (eq. (2.20)) du Beamforming-MS est donc très différente. Cela est particulièrement problématique en présence de bruit de mesure car les points de calcul les plus éloignés de l'antenne donnent lieu à une estimation de pression acoustique ne correspondant pas à une source réelle mais amplifiée par la méthode. La figure 2.18 met en évidence ce phénomène, les effets de bords sont d'autant plus importants que le bruit de mesure est important, la dynamique de localisation est donc réduite. L'influence du choix des géométries de calcul et de mesure sur les résultats de localisation de sources a fait l'objet de plusieurs études dans la littérature. En effet, Pereira a constaté l'influence du positionnement de l'antenne par rapport à la grille de calcul sur les résultats de localisation de sources, il a ainsi proposé une pondération de la matrice de transfert par les distances entre les points de calcul et le centre de l'antenne [Pereira 2013]. Des publications sur la formation de voies de véhicule au passage ont proposées une pondération ramenant l'estimation des pressions acoustiques équivalentes à un mètre à une estimation de pressions acoustiques relatives au centre géométrique A_c de l'antenne [Bruhl 2005, Brooks 2006a, Guérin 2006].

La fonction de transfert, désormais utilisée dans l'expression (2.18) du Beamforming-MS par bloc, entre un point de mesure A_m et un point de calcul X_l pour le k -ième bloc est obtenue en modifiant l'équation (2.19) et vaut :

$$\mathbf{g}_{\text{ref}}(A_m, X_l(t^k), f) = \frac{d_{cl}(t^k)}{4\pi d_{ml}(t^k)} \exp(-j2\pi \frac{f}{c} d_{ml}(t^k)) \quad (2.50)$$

avec l'indice $_{\text{ref}}$ signifiant que la fonction de transfert est liée au centre A_c de l'antenne, $d_{cl}(t^k) = \|A_c X_l(t^k)\|$ la distance entre le centre de l'antenne et le point de calcul $X_l(t^k)$ au k -ième bloc temporel (eq. (2.11)).

Le Beamforming-MS au k -ième bloc, calculé avec l'équation (2.18), utilise alors le terme de normalisation suivant :

$$w_{l,\text{ref}}(k) = \frac{1}{\mathbf{g}_{\text{ref}}^H(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{g}_{\text{ref}}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f)} \quad (2.51)$$

avec $\mathbf{g}_{\text{ref}}(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) = [\frac{d_{cl}(t^k)}{4\pi d_{l1}(t^k)} \exp(-j2\pi \frac{f}{c} d_{l1}(t^k)), \dots, \frac{d_{cl}(t^k)}{4\pi d_{Ml}(t^k)} \exp(-j2\pi \frac{f}{c} d_{Ml}(t^k))]^T$.

D'après l'équation (2.25) qui exprime la réponse d'antenne théorique du Beamforming-MS par bloc au k -ième bloc, la réponse d'antenne au k -ième bloc évaluée en X_l et centrée en S_n s'écrit donc maintenant :

$$psf_{\text{ref}}(X_l(t^k), S_n(t^k), f) = w_{l,\text{ref}}(t^k) \mathbf{g}_{\text{ref}}^H(\mathbf{a}; X_l(t^k), f) \mathbf{g}(\mathbf{a}; S_n(t^k), f) \quad (2.52)$$

D'après les équations (2.19), (2.50) et (2.51), l'amplitude du maximum du lobe principal de la réponse d'antenne dans la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc au k -ième bloc est égale à :

$$\begin{aligned} psf_{\text{ref}}(S_n(t^k), S_n(t^k), f) &= w_{l,\text{ref}}(t^k) \mathbf{g}_{\text{ref}}^H(\mathbf{a}; S_n(t^k), f) \mathbf{g}(\mathbf{a}; S_n(t^k), f) \\ &= \left(\sum_{m=1}^M \frac{d_{cl}^2(t^k)}{(4\pi d_{ml}(t^k))^2} \right)^{-1} \sum_{m=1}^M \frac{d_{cl}(t^k)}{(4\pi d_{ml}(t^k))^2} \\ &= \frac{1}{d_{cl}(t^k)} \end{aligned} \quad (2.53)$$

Cela signifie qu'avec cette nouvelle pondération, le Beamforming-MS par bloc estime les autospectres inconnus de sources équivalentes aux points $X_l, l \in [1, L]$ et ces derniers sont amplifiés d'un facteur $\frac{1}{d_{cl}(t^k)}$. Les sources équivalentes situées aux extrémités de la grille de calcul seront donc plus atténuées que celles estimées au niveau du centre de la grille de calcul.

La déconvolution de ce nouveau Beamforming-MS par bloc est réalisée en utilisant le modèle précédent de réponse d'antenne moyenne dont la valeur au point X_l pour le k -ième bloc est donnée par l'équation (2.25).

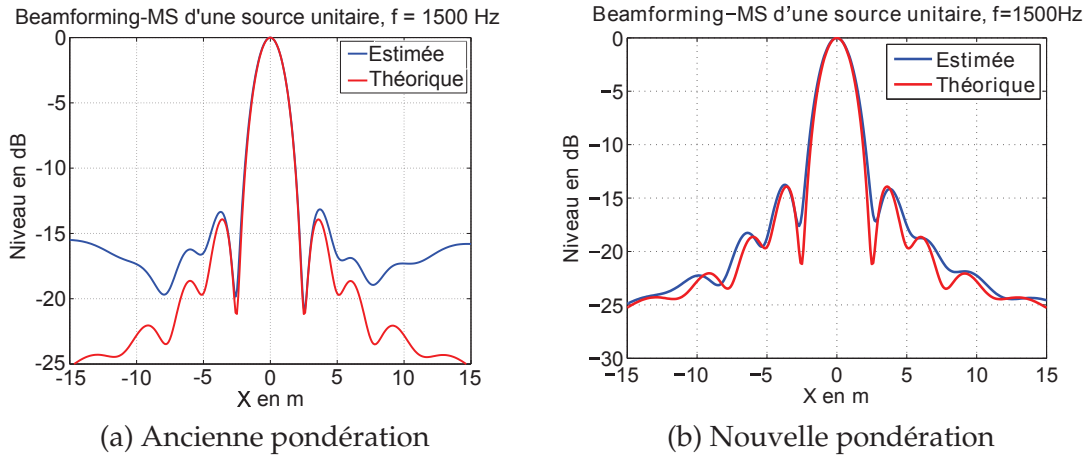


FIGURE 2.32 – Simulation d'une source de vitesse $v = 2m.s^{-1}$ sans bruit de mesure, résultats à la fréquence $f = 1500Hz$. Valeur de l'estimateur du Beamforming-MS par bloc (—) avec l'ancienne pondération (a) et avec la nouvelle pondération. Valeur théorique du Beamforming-MS par bloc avec la pondération initiale et l'hypothèse de déplacement de source négligeable (—).

La sous-figure 2.32b compare le résultat du Beamforming-MS par bloc avec la nouvelle pondération (en bleu) d'une source de vitesse $v = 2m.s^{-1}$ localisée au centre de la grille de calcul et la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc avec la pondération initiale et l'hypothèse de déplacement de sources négligeable durant un bloc (en rouge), à $f = 1500Hz$. La sous-figure 2.32a rappelle ici le résultat du Beamforming-MS obtenu avec l'ancienne pondération (en bleu) (fig. 2.25). Contrairement au résultat du Beamforming-MS avec l'ancienne pondération représenté en bleu sur la figure 2.25, la nouvelle pondération permet de calculer un estimateur de Beamforming-MS (en bleu) qui est proche de la valeur théorique du Beamforming-MS par bloc initiale (en rouge) (fig. 2.32b) présenté dans le paragraphe 2.3.1.3.

Afin d'évaluer les améliorations des résultats de localisation de sources induites par cette nouvelle pondération, le Beamforming-MS par bloc avec l'ancienne pondération est rappelé sur la figure 2.33a et le Beamforming-MS avec la nouvelle pondération est présenté sur la figure 2.33b, pour la simulation de deux sources de bruit blanc incohérentes avec un bruit de mesure associé à un RSB de 5 dB. Ces résultats sont représentés dans le plan distance-

fréquence $[-15m; +15m] \times [500Hz; 2000Hz]$.

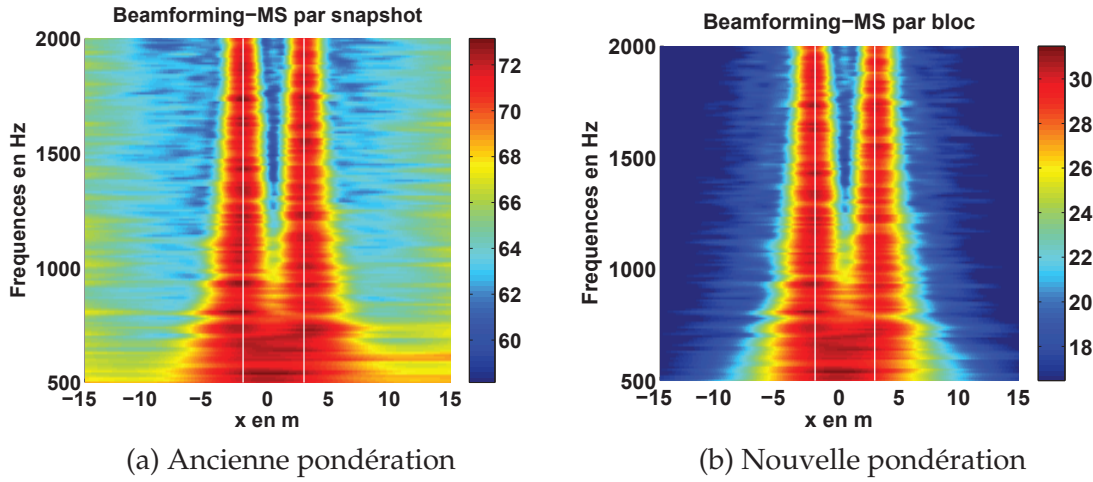


FIGURE 2.33 – Simulation avec deux sources incohérentes avec un $RSB = 5dB$. Localisation de sources par Beamforming-MS avec l'ancienne pondération (a) et avec la nouvelle pondération (b).

Par comparaison des figures 2.33a et 2.33b, nous pouvons attester que les effets de bords ont bien été supprimés grâce à cette nouvelle pondération. En effet, la pression acoustique focalisée sur les bords de la grille de calcul par Beamforming-MS par bloc est désormais atténuée et la dynamique de localisation est meilleure avec la nouvelle pondération.

Une étape de déconvolution par SDM est ensuite appliquée aux figures 2.33a et 2.33b. Les résultats de déconvolution sont représentés de la même façon sur les figures 2.34a et 2.34b.

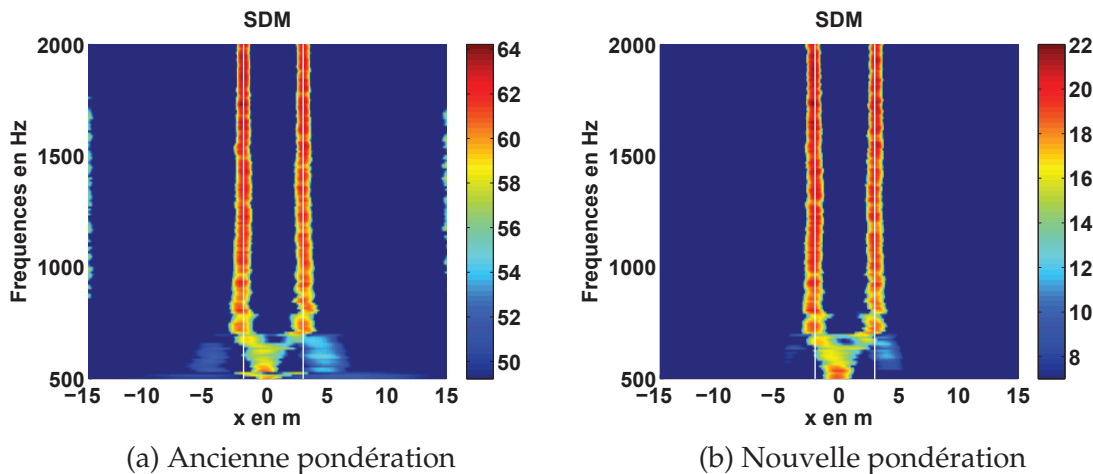


FIGURE 2.34 – Simulation avec deux sources incohérentes avec un $RSB = 5dB$. Localisation de sources par SDM avec l'ancienne pondération (a) et avec la nouvelle pondération (b).

Dans les résultats de déconvolution de la figure 2.34a, une énergie importante est affectée aux extrémités de la grille de calcul sur la bande $[900\text{Hz}; 1800\text{Hz}]$, ce qui n'est plus le cas dans la figure 2.34b.

En conclusion, la nouvelle stratégie de pondération du Beamforming-MS par bloc permet d'éliminer les effets de bord dus à une grille de calcul grande par rapport à la distance de mesure. L'énergie importante qui était reconstruite sur les extrémités de la grille de calcul après déconvolution est redistribuée sur le reste de la grille de calcul grâce à cette nouvelle pondération. Les mauvaises interprétations des résultats de déconvolution induites par l'existence de sources non physiques avec un spectre de contribution de fort niveau seront donc évitées. Enfin, cette nouvelle pondération ne permet plus d'estimer la pression acoustique des sources rayonnée à un mètre, les résultats de Beamforming-MS et de déconvolution ne sont donc plus absolument quantitatifs mais relatifs.

2.4.3 Antenne à ouverture synthétique

Comme discuté dans le paragraphe 2.3.2.4, la résolution du Beamforming-MS est limitée en basses fréquences car elle est dépend de l'inverse de la longueur d'onde de travail (éq. (2.39)). Plusieurs stratégies ont été adoptées dans la littérature pour améliorer la résolution de la méthode de formation de voies classique qui sont applicables au cas de sources mobiles :

- Une stratégie matérielle consistant à construire des sous-antennes imbriquées au sein d'une antenne globale pour obtenir une résolution spatiale identique sur différentes bandes fréquentielles [Brooks 1987, Wang 2004b]. Sur des antennes à trop faible nombre de capteurs, cette stratégie ne s'est pas révélée très convaincante (fig. 2.7) car la dynamique est limitée.
- Une stratégie de pondération des pressions mesurées par les capteurs de l'antenne permettant de réduire la taille des lobes de la réponse d'antenne [Van Veen 1988], ces poids sont intégrés dans le facteur de normalisation w_l de l'équation (2.13). Cette pondération a un rôle de fenêtrage spatial de l'antenne comme les fenêtres d'apodisation classiquement appliquées à une transformée de Fourier temporelle court terme. L'amélioration de la résolution par cette stratégie implique une dégradation de la dynamique de localisation.

Ces différentes stratégies sont donc limitées par le compromis entre la résolution et la dynamique. La deuxième amélioration du Beamforming-MS par bloc proposée ici permet d'améliorer la résolution de la localisation de sources tonales sans dégrader la dynamique de localisation.

Cette amélioration est un traitement passif d'antenne à ouverture synthétique dans le but d'augmenter virtuellement le nombre de capteurs disponibles. Ce traitement tire profit du mouvement relatif entre les sources et l'antenne pour construire des mesures acoustiques virtuelles synchronisées avec les mesures réelles. Un des objectifs de ce traitement est d'améliorer la résolution du Beamforming-MS en basses fréquences pour le cas de localisation de sources tonales telles que les fréquences associées aux bruits des machines internes ou la fré-

quence de passage de pale du propulseur. Dans cette étude, la bande fréquentielle de travail est $[500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$ comme spécifié dans le paragraphe 1.4.2.1. Dans cette sous-section, l'algorithme de synthèse d'ouverture est utilisée pour doubler l'envergure de l'antenne. Cela permet ainsi de diminuer de moitié la résolution du Beamforming-MS d'après l'équation (2.39) et donc de diminuer de moitié la fréquence de travail la plus basse, sans modifier physiquement l'antenne de mesure.

De nombreuses études ont été réalisées sur les méthodes passives d'antenne à ouverture synthétique durant les dernières décennies. Ces études concernent majoritairement l'utilisation d'antennes tractées pour l'imagerie de fonds marins ou la détection de menaces. Stergiopoulos *et al.* ont développé la méthode *Extended Towed-Array Method* (ETAM) qui synchronise les pressions virtuelles sur des blocs temporels associés à des couples d'hydrophones réels et virtuels en recouvrement [Stergiopoulos 1989]. Cette technique de corrélation est robuste aux erreurs de trajectographie et sera adoptée dans cette étude. D'autres méthodes tirent profit du gain d'un pré-traitement de formation de voies pour ensuite construire une antenne synthétique robuste aux faibles RSB et traiter des cas multi-sources. Par exemple, Yen *et al.* ont proposé l'algorithme *Fast Fourier Transform Synthetic Aperture* (FFTSA) qui compense la phase de spectres focalisés de sous-antennes pour construire l'antenne synthétique, au lieu de compenser les pressions mesurées [Yen 1989]. De la même manière, Tong *et al.* ont étendu la méthode ETAM au cas de plusieurs sources avec des trajectoires différentes en utilisant un pré-traitement de formation de voies sur des sous-antennes [Tong 2006].

2.4.3.1 Méthode passive de synthèse d'ouverture

Méthode classique d'ouverture synthétique passive

La méthode classique d'ouverture synthétique passive est réalisée en deux étapes [Williams 1976] :

1. Construction des pressions virtuelles à partir des pressions mesurées, qui sont retardées d'une durée ζ_0 correspondant au décalage de position entre les capteurs réels et les capteurs virtuels, selon les propriétés géométriques de la propagation acoustique ;
2. Synchronisation des pressions mesurées par l'antenne réelle et les pressions mesurées par les antennes virtuelles, à partir de la phase déterministe des sources.

On considère le cas particulier de construction d'une antenne virtuelle $\{V_m\}_{m=1..M}$ possédant uniquement un capteur en recouvrement avec l'antenne réelle $\{A_m\}_{m=1..M}$. Un capteur en recouvrement est un capteur positionné virtuellement à la même position qu'un capteur réel. La même méthodologie peut être appliquée pour le cas de plusieurs capteurs en recouvrement. Notons qu'il est nécessaire qu'il y ait au moins un capteur en recouvrement lors de la construction d'une antenne synthétique. La figure 2.35 illustre le cas d'une antenne virtuelle avec un unique capteur en recouvrement ; le capteur virtuel V_1 est construit à partir du capteur réel A_1 , et V_1 est construit dans la même position que le capteur réel A_M^r , où l'indice r indique le recouvrement.

La figure 2.35 représente en gris une antenne linéaire réelle $\{A_m\}_{m=1..M}$ et en cercles noirs une antenne virtuelle $\{V_m\}_{m=1..M}$ construite à une distance de $+\Delta X$ de la position de l'antenne réelle selon x . La distance $+\Delta X$ correspond au déplacement du véhicule pendant la durée ζ_0 . Supposant la stationnarité des sources acoustiques du véhicule et l'homogénéité du milieu de propagation, la propagation acoustique entre le véhicule et l'antenne virtuelle à l'instant t est ensuite géométriquement identique à celle entre l'antenne réelle et le véhicule à un instant $t - \zeta_0$. À titre d'illustration, sur la figure 2.35, les chemins acoustiques sont représentés par les flèches en trait continu, en accord avec la théorie des rayons.

Les pressions temporelles $\check{p}_v(V_m, t)$ synthétiquement mesurées par le capteur virtuel V_m sont construites de la manière suivante :

$$\check{p}_v(V_m, t) = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F} [\check{p}_a(A_m, t - \zeta_0)] (f) \exp (+j2\pi f_s \zeta_0)] (t) \quad (2.54)$$

avec $\mathcal{F}[\cdot]$ est la transformée de Fourier, f_s est la fréquence de la source tonale et $2\pi f_s \zeta_0$ est le déphasage nécessaire à la synchronisation du capteur virtuel V_m au capteur réel correspondant A_m . Dans le cas d'un mouvement linéaire du véhicule à une vitesse constante v , le retard ζ_0 qui correspond au décalage ΔX selon x est simplement exprimé par :

$$\zeta_0 = \frac{\Delta X}{v} \quad (2.55)$$

La précision de l'estimation du retard ζ_0 est fortement dépendante de la connaissance de la trajectoire du véhicule et des propriétés du milieu de propagation. En pratique, la trajectoire est souvent qu'approximativement connue, notamment pour les navires de surface qui sont très perturbés dans leur trajectoire par l'état de surface de la mer. Pour compenser ces incertitudes de trajectoire, une meilleure estimation du retard de synchronisation, plus robuste, est calculée à partir de ζ_0 en utilisant la technique de corrélation proposée par Stergiopoulos *et al.* [Stergiopoulos 1989], présentée dans le paragraphe suivant.

Robustesse de la synchronisation des antennes virtuelles

On note ζ le nouveau retard de synchronisation qui sera calculé à partir de ζ_0 . Stergiopoulos *et al.* ont d'abord proposé de calculer ce retard en utilisant l'intercorrélation entre les pressions mesurées par les capteurs réels et les capteurs virtuels en recouvrement [Stergiopoulos 1989] pour que la synchronisation soit robuste aux incertitudes de modèle. Pour l'exemple représenté sur la figure 2.35, le temps de synchronisation est estimé en calculant l'intercorrélation entre les pressions mesurées utilisées pour la paire de capteurs en recouvrement $(A_M^r; V_1)$, c'est-à-dire les signaux mesurés par les capteurs A_1 et A_M :

$$\zeta = \arg \max_u \int_t \check{p}_a(A_1, t - \zeta_0) \check{p}_a(A_M^r, t - u) dt \quad (2.56)$$

La pression virtuelle reçue au capteur virtuel V_m et synchronisée par ce retard ζ s'expriment alors par :

$$\check{p}_v(V_m, t) = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F} [\check{p}_a(A_m, t - \zeta_0)] (f) \exp (+j2\pi f_s \zeta)] (t) \quad (2.57)$$

Dans le cas des sources tonales, le retard de synchronisation ζ n'est souvent pas égal au retard associé à la construction de l'antenne synthétique ζ_0 car l'intercorrélation temporelle fournira une estimée de ζ à une période du signal source près, *i.e.* à $\frac{1}{f_s}$ près.

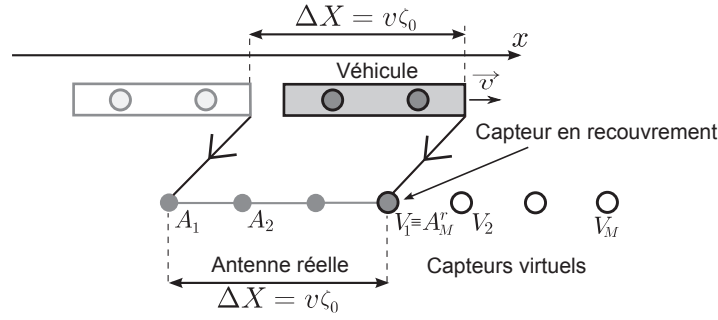


FIGURE 2.35 – Cas particulier d’une antenne virtuelle construite à partir d’une antenne réelle avec seulement un capteur réel A_M^r en recouvrement avec un capteur virtuel V_1 .

Stratégie de synchronisation court terme

Pour être robuste à tout changement dans les conditions de propagation durant le passage du véhicule tel qu’un défaut d’uniformité de la vitesse ou des non-stationarités des propriétés du milieu de propagation, les pressions virtuelles sont construites en employant une stratégie court terme [Stergiopoulos 1989]. En supposant que le déplacement des sources est négligeable pendant un bloc temporel de durée T , la construction de l’antenne virtuelle peut être réalisée pour chaque bloc indicé par k et correspondant aux instants t^k . La construction de l’antenne virtuelle au k -ième bloc est réalisée en définissant un retard ζ_0^k calculé à partir de l’équation (2.55) avec la valeur du déplacement des sources ΔX^k de la vitesse v^k des sources à l’instant t^k . De manière similaire à l’équation (2.56), la synchronisation des pressions virtuelles est réalisée en calculant un retard de synchronisation ζ^k par intercorrélation du couple de capteurs en recouvrement $(A_M^r; V_1)$, au k -ième bloc (fig. 2.35) :

$$\zeta^k = \arg \max_u \int_t \check{p}_a^k(A_1, t - \zeta_0^k) \check{p}_a^k(A_M^r, t - u) dt \quad (2.58)$$

où $\check{p}^k(A_m, t)$ est le signal temporel de pression mesurée par le capteur réel A_m durant le k -ième bloc. Le signal temporel de pression virtuelle $\check{p}^k(V_m, t)$ reçue au capteur virtuel V_m au k -ième bloc s’écrit alors mathématiquement :

$$\check{p}_v^k(V_m, t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F} \left[\check{p}_a^k(A_m, t - \zeta_0^k) \right] (f) \exp \left(+j2\pi f_s \zeta^k \right) \right] (t) \quad (2.59)$$

Ce cas particulier peut être généralisé au cas de plusieurs capteurs en recouvrement, le retard de synchronisation est alors la moyenne des valeurs estimées ζ^k sur tous les blocs.

Indicateurs expérimentaux de qualité de synchronisation

Dans le but d’attester objectivement de la qualité de la synchronisation des pressions virtuelles et des pressions réelles, deux indicateurs issus de la littérature [Paillasseur 2011] sont calculés pour chaque paire de capteurs en recouvrement :

- Indicateur T_1 : Il correspond à un coefficient de corrélation qui évalue la qualité de la synchronisation de phase ($T_1 = 1$: signaux en phase). Pour une paire de capteurs en

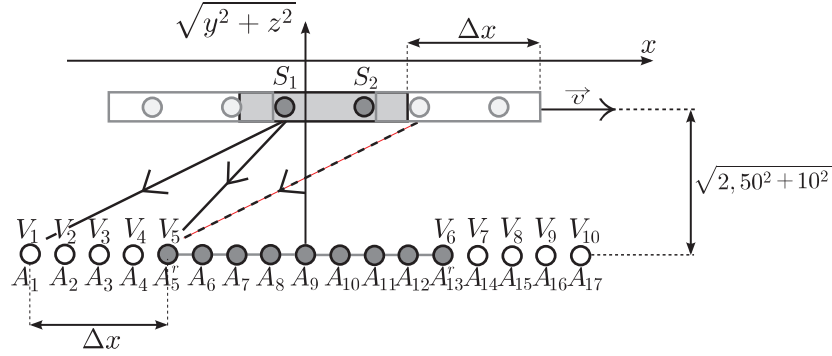


FIGURE 2.36 – Simulation de deux sources de fréquence pure 500Hz : Géométrie de la configuration simulée pour valider le traitement passif d'antenne à ouverture synthétique.

recouvrement (V_m, A_n^r) , cet indicateur a pour expression :

$$T_1 = \frac{\langle \check{p}_v(V_m, t) \cdot \check{p}_a(A_n^r, t) \rangle}{\sqrt{\langle \check{p}_v(V_m, t)^2 \rangle \langle \check{p}_a(A_n^r, t)^2 \rangle}} \quad (2.60)$$

avec $\langle . \rangle$ l'opérateur de moyenne temporelle.

- Indicateur T_2 : Il correspond à une erreur sur l'énergie reconstruite et par conséquent doit tendre vers zéro pour que la construction de l'antenne virtuelle soit correcte. Pour une paire de capteurs en recouvrement (V_m, A_n^r) , cet indicateur a pour expression :

$$T_2 = \frac{\left| \sqrt{\langle \check{p}_a(A_n^r, t)^2 \rangle} - \sqrt{\langle \check{p}_v(V_m, t)^2 \rangle} \right|}{\sqrt{\langle \check{p}_a(A_n^r, t)^2 \rangle}} \quad (2.61)$$

2.4.3.2 Validations numériques

Afin de valider l'amélioration des résultats de Beamforming-MS par le pré-traitement passif d'antenne à ouverture synthétique, deux sources sinusoïdales de fréquence 500Hz espacées de 5m sont simulées en mouvement rectiligne selon x , à la vitesse de $v = 2m.s^{-1}$. Les sources passent au-dessus d'une antenne régulière linéaire $\{A_m\}_{m=1..M}$ de $M = 17$ hydrophones, espacés de 50cm selon x . La durée d'acquisition est $T_{acq} = 4s$ et la durée des blocs temporels est choisie égale à $T = 100ms$, il y a donc 79 blocs temporels. L'antenne est centrée en l'origine du repère cartésien et le mouvement des sources est contenu dans l'intersection des plans $y = 2,50m$ et $z = +10m$. Les paramètres géométriques sont représentés sur la figure 2.36. La fréquence 500Hz pour les sources a été choisie car c'est la limite basse fréquence pour l'antenne de 9 hydrophones espacés de 50cm, la localisation des deux sources distantes de 5m n'est pas résolue par l'antenne alors qu'une antenne de 17 hydrophones le peut.

L'ouverture de l'antenne réelle $\{A_m\}_{m=5..13}$ de 9 hydrophones est synthétiquement doublée comme représenté schématiquement sur la figure 2.36. La nouvelle antenne est alors l'ensemble des 17 capteurs $\{\{V_m\}_{1..4}, \{A_m\}_{5..13}, \{V_m\}_{7..10}\}$, les paires de capteurs $(A_5^r; V_5)$ et

$(A_{13}^r; V_6)$ sont en recouvrement pour permettre l'estimation du temps de synchronisation par l'équation (2.58). Afin de valider la bonne construction des pressions virtuelles, l'antenne synthétique de 17 capteurs est construite sur les positions d'une antenne réelle de 17 capteurs $\{A_m\}_{1..17}$. Les résultats obtenus par l'antenne synthétique de 17 hydrophones, $\{\{V_m\}_{1..4}, \{A_m\}_{5..13}, \{V_m\}_{7..10}\}$, seront donc comparés aux résultats obtenus avec l'antenne réelle de 17 hydrophones, $\{A_m\}_{m=1..17}$.

Trois simulations sont réalisées avec la configuration de la figure 2.36 :

1. Une simulation sans bruit de mesure et sans erreur de trajectoire afin de valider le principe de l'algorithme de synthèse d'ouverture
2. Une simulation avec bruit de mesure et sans erreur de trajectoire car la synchronisation dépend de la qualité des pressions mesurées
3. Une simulation sans bruit de mesure et avec une erreur de trajectoire car la synchronisation dépend de la connaissance *a priori* de la trajectoire

Les performances de l'algorithme de synthèse d'ouverture sont évaluées au travers de la valeur des indicateurs T_1 et T_2 ainsi que par comparaison des résultats de Beamforming-MS avec et sans ouverture synthétique.

Simulation sans bruit de mesure et sans erreur de trajectoire

Sans bruit de mesure et sans erreur de trajectoire et pour des sources sinusoïdales, la synchronisation des capteurs virtuels avec les capteurs réels est parfaite et les signaux mesurés par les capteurs en recouvrement sont en phase sur toute la durée d'acquisition, l'indicateur T_1 est donc toujours égal à 1. De plus, l'indicateur T_2 est toujours égal à 0 car les pressions reçues au niveau des capteurs en recouvrement sont strictement égales. Afin de valider les améliorations qu'induit ce pré-traitement sur les méthodes de localisation de sources, les résultats de Beamforming-MS sont représentés pour l'antenne réelle $\{A_m\}_{5..13}$ de 9 capteurs (en noir), pour l'antenne réelle $\{A_m\}_{1..17}$ de 17 capteurs (en rouge) et pour l'antenne synthétique de 17 hydrophones (en tirets verts) construite à partir de 9 hydrophones sur la figure 2.37, à la fréquence $f = 500\text{Hz}$. Le résultat de Beamforming-MS obtenu avec l'antenne synthétique de 17 hydrophones est égal au résultat obtenu avec l'antenne réelle de 17 hydrophones, cela valide la capacité de l'algorithme de synthèse d'ouverture à agrandir virtuellement l'antenne réelle à partir de la connaissance du mouvement des sources. La perfection du résultat de localisation était prévisible au vu des valeurs idéales des indicateurs $T_1 = 1$ et $T_2 = 0$.

Simulation avec bruit de mesure et sans erreur de trajectoire

Dans ce paragraphe, la sensibilité des performances de l'algorithme de synthèse d'ouverture est étudiée en fonction du niveau de bruit de mesure. Le bruit de mesure blanc et gaussien est ici généré avec un RSB satisfaisant l'équation (2.38) avec $T_{acq} = [3s; 7s]$ et $B_f = [400\text{Hz}; 600\text{Hz}]$. La figure 2.38 représente les performances de l'antenne synthétique pour une simulation sans bruit de mesure en noir, avec un $RSB = 10\text{dB}$ en vert, avec un

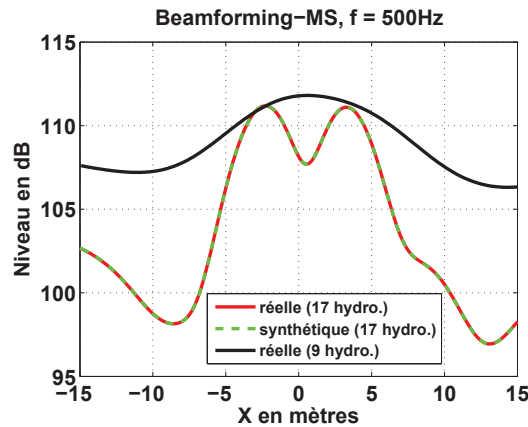


FIGURE 2.37 – Simulation de deux sources sinusoïdales de fréquence 500Hz : Résultat de Beamforming-MS par bloc à $f = 500\text{Hz}$ avec l'antenne réelle de 9 hydrophones $\{A_m\}_{5..13}$ (—), l'antenne synthétique de 17 hydrophones $\{\{V_m\}_{1..4}, \{A_m\}_{5..13}, \{V_m\}_{7..10}\}$ (---) et l'antenne réelle de 17 hydrophones $\{A_m\}_{1..17}$ (—).

$RSB = 5\text{dB}$ en rouge et avec un $RSB = 0\text{dB}$ en bleu. Sur la sous-figure 2.38a, les indicateurs T_1 et T_2 sont calculés pour les pressions temporelles de la paire $(A_5^r; V_5)$ filtrées sur B_f . Les résultats du Beamforming-MS obtenus par l'antenne synthétique de 17 hydrophones sont représentés sur la sous-figure 2.38b pour les différents niveaux de bruit de mesure, le résultat obtenu sans bruit de mesure étant égal au résultat obtenu par l'antenne réelle de 17 hydrophones.

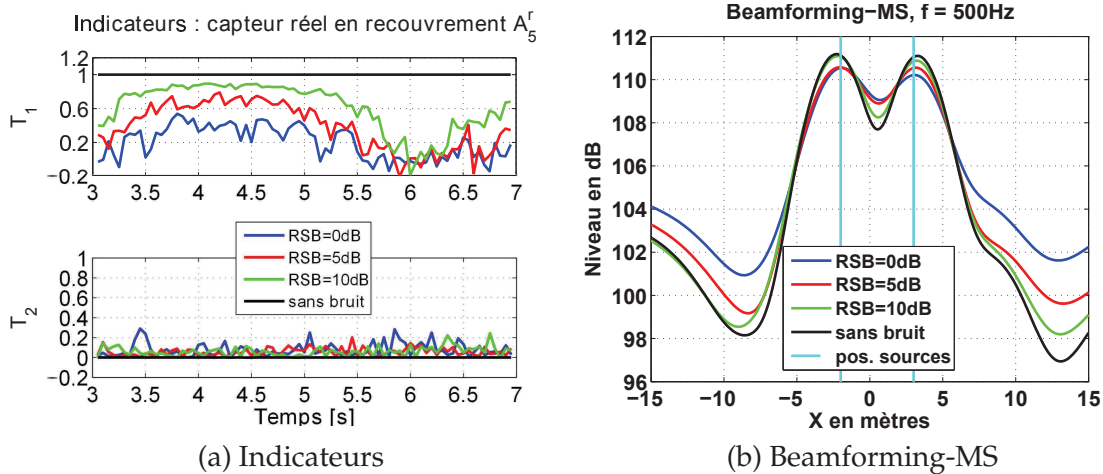


FIGURE 2.38 – Simulation de deux sources sinusoïdales de fréquence 500Hz sans bruit de mesure (—), avec $RSB = 10\text{dB}$ (—), avec $RSB = 5\text{dB}$ (—) et avec $RSB = 0\text{dB}$ (—). Valeurs des indicateurs T_1 sur la sous-figure supérieure et T_2 sur la sous-figure inférieure pour les différentes valeurs de RSB (a). Résultat de Beamforming-MS à $f = 500\text{Hz}$ pour l'antenne synthétique de 17 hydrophones pour différentes valeurs de RSB (b). Les positions théoriques des sources sont indiquées par des traits cyans.

La table 2.3 présente les performances en localisation des résultats de Beamforming-MS de la figure 2.38b.

RSB	Dynamique	Résolution	Erreur de localisation
0dB	6,1dB	5m	Erreur sur \hat{S}_1 : 0m Erreur sur \hat{S}_2 : 0,1m
5dB	7,3dB	5m	Erreur sur \hat{S}_1 : 0m Erreur sur \hat{S}_2 : 0,2m
10dB	8,4dB	5m	Erreur sur \hat{S}_1 : -0.2m Erreur sur \hat{S}_2 : +0.3m
Sans bruit	8,5dB	4,4m	Erreur sur \hat{S}_1 : -0.3m Erreur sur \hat{S}_2 : +0.3m

TABLE 2.3 – Performances de localisation à $f = 500\text{Hz}$ du Beamforming-MS de la figure 2.38b.

Quel que soit le niveau de bruit de mesure, les deux sources sont bien localisées car l'erreur de localisation lorsqu'elle existe est de l'ordre de la distance de déplacement des sources pendant un bloc temporel (0,2 mètres) d'après la table 2.3. En présence de bruit de mesure, l'indicateur T_2 reste proche de zéro ce qui signifie que les amplitudes des capteurs A_5^r et V_5 sont très proches. En revanche, l'indicateur T_1 se dégrade d'autant plus que le niveau de bruit de mesure augmente, ce qui signifie que les signaux sont moins en phase. De plus, le bruit de mesure a ici le même effet que pour une antenne réelle, on constate une augmentation du niveau de la pression estimée sur tous les points de calcul dégradant ainsi la dynamique de localisation comme le montre la table 2.3.

Simulation sans bruit de mesure et avec une erreur de trajectoire

La trajectographie d'une mesure de bruit de passage d'un navire présente souvent quelques incertitudes. On suppose ici une trajectoire *a priori* rectiligne uniforme avec une vitesse de navire $v = 2\text{m.s}^{-1}$ et une trajectoire réelle présentant une faible erreur par rapport à la trajectoire *a priori*. L'erreur de trajectographie est une variation de la vitesse $v(t)$ du navire selon x . La vitesse réelle du navire prend les valeurs suivantes :

- $v = 2\text{m.s}^{-1}$ sur $[0\text{s}; 5\text{s}]$ et sur $[8\text{s}; 10\text{s}]$
- $v = 0,66\text{m.s}^{-1}$ sur $[5\text{s}; 6,5\text{s}]$
- $v = 3,33\text{m.s}^{-1}$ sur $[6,5\text{s}; 8\text{s}]$

Les traitements sont ici réalisés sur l'intervalle temporel $[3\text{s}; 7\text{s}]$. Les indicateurs, T_1 (en trait continu) et T_2 (en tirets), sur la qualité de la construction de l'antenne synthétique avec la trajectoire *a priori* erronée sont représentés sur la figure 2.39a, les indicateurs pour la paire de capteurs (A_5^r ; V_5) sont représentés en bleu et pour la paire de capteurs (A_{13}^r ; V_6) en rouge. La figure 2.39b représente les résultats de Beamforming-MS à la fréquence $f = 500\text{Hz}$ pour l'antenne synthétique et la trajectoire *a priori* en noir et pour l'antenne réelle avec la trajectoire *a priori* en rouge.

La table 2.4 présente les performances en localisation des résultats de Beamforming-MS de la figure 2.39b.

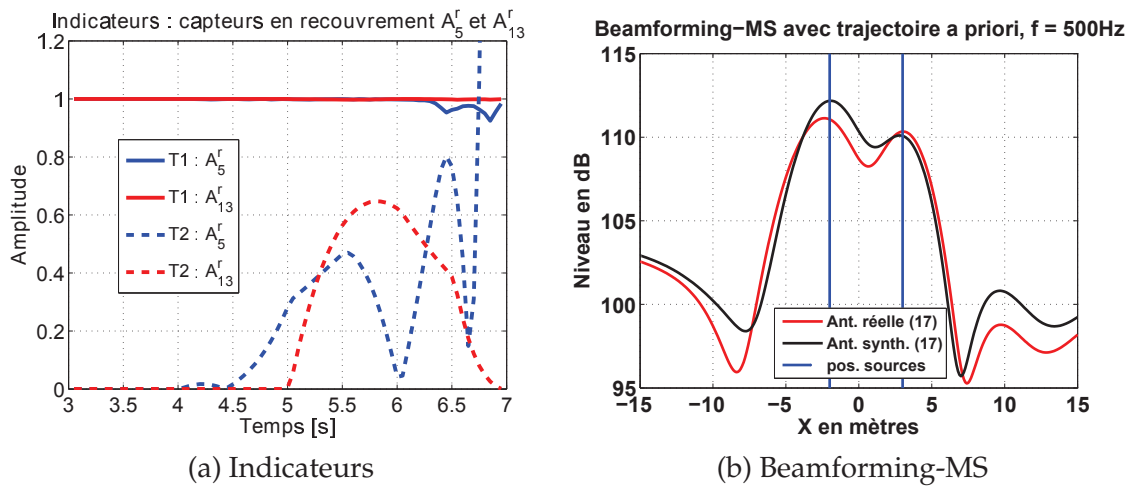


FIGURE 2.39 – Simulation de deux sources sinusoïdales de fréquence 500Hz avec une erreur de trajectoire selon x . Valeurs des indicateurs T_1 en trait continu et T_2 en tirets pour les différentes valeurs de RSB, à gauche. Résultat de Beamforming-MS à $f = 500\text{Hz}$ pour l'antenne synthétique avec la trajectoire initiale (—), pour l'antenne réelle avec la trajectoire initiale (—). Les positions théoriques des sources sont indiquées par des traits bleus.

Type d'antenne	Dynamique	Résolution	Erreur de localisation
Réelle (17)	7,7dB	5,2m	Erreur sur \hat{S}_1 : -0,4m Erreur sur \hat{S}_2 : 0,1m
Synthétique (17)	7,2dB	5,3m	Erreur sur \hat{S}_1 : 0m Erreur sur \hat{S}_2 : -0,1m

TABLE 2.4 – Performances de localisation à $f = 500\text{Hz}$ du Beamforming-MS de la figure 2.39b.

Contrairement au bruit de mesure, l'erreur de trajectographie dégrade ici l'indicateur T_2 dont la valeur n'est plus proche de zéro. Cette observation est logique car en présence d'erreur de trajectographie, les pressions virtuelles sont construites avec des pressions qui ne sont pas associées aux positions réelles des sources et donc avec des distances de propagation mal évaluées. Ces différences d'amplitude entre pressions virtuelles et pressions réelles se traduisent par des valeurs d'indicateur T_2 non nulles. L'indicateur T_1 tend tout de même vers 1 ce qui démontre la robustesse de la méthode de synchronisation par intercorrélation des pressions de capteurs en recouvrement (éq. (2.58)) aux erreurs de trajectographie.

La robustesse de la méthode de synchronisation se constate également par l'amélioration de la résolution et de la dynamique du Beamforming-MS qui sont quasiment égales aux performances obtenues par une antenne réelle de 17 capteurs, comme le montre la table 2.4.

2.4.3.3 Conclusions et perspectives

Les validations de la méthode de synthèse d'ouverture par simulation ont confirmé l'efficacité d'une telle méthode pour améliorer la résolution de la formation de voies pour des sources de longueur de corrélation temporelle suffisante. Cette méthode s'est révélée particulièrement robuste en présence de bruit de mesure et avec des erreurs de trajectographie.

Une perspective de cette étude serait d'améliorer la limite haute fréquence de l'antenne réduite due au repliement spectral en construisant une antenne synthétique entrelacée avec l'antenne réelle afin de densifier le nombre de capteurs de l'antenne pour une même envergure. En effet, l'antenne de mesure étant une répartition discrète de capteurs, le repliement spectral intervient pour une fréquence telle que la longueur d'onde λ soit égale au double du plus petit espacement inter-capteur. Ainsi, l'algorithme d'ouverture synthétique peut être appliqué afin de réduire le plus petit espacement inter-capteur et donc repousser la limite haute fréquence de l'antenne réelle. De plus, les valeurs des indicateurs T_1 et T_2 peuvent également être utilisés comme critère de qualité de l'information portée par les blocs temporels de pressions mesurées. Par exemple, les blocs temporels associés à une faible valeur de T_1 , *i.e.* signaux virtuels déphasés, ou une grande valeur de T_2 , *i.e.* grande erreur d'amplitude, pourraient être rejetés car ils apportent plus de perturbations que de signal utile pour le Beamforming-MS. Enfin, dans le cadre du projet ARMADA, des méthodes de séparation de sources aveugles ont été proposées afin d'améliorer la localisation de sources large bande spatialement proches [Ouedraogo 2014]. Ces approches sont complémentaires au traitement de synthèse d'ouverture qui ne s'applique que pour les sources tonales.

2.4.4 Correction de trajectographie par analyse des résultats de formation de voies

La trajectographie pour les mesures de bruit de passage est actuellement réalisée par des systèmes RADAR [Kook 2000] ou des outils GPS [Fleury 2011]. Or, il est souvent difficile et coûteux de disposer d'un système de trajectographie fiable. Les algorithmes de suivi de cible sont nombreux bien qu'aucun ne soit appliqué à des fins d'imagerie acoustique. Par exemple, des méthodes de sous-espaces ont été proposées pour suivre des cibles mobiles [Eriksson 1994] et des filtres particuliers ont également été proposés dans la littérature afin de traiter le problème de suivi temporel de plusieurs cibles mobiles [Antonacci 2006, Valin 2007].

Dans cette étude, le problème traité est plus simple : toutes les sources acoustiques ont la même trajectoire, celle du véhicule, et une estimée de leur trajectoire est disponible. Dans ce contexte, une méthode originale est proposée afin de corriger acoustiquement la trajectoire initialement connue en utilisant une intercorrélaton spatiale entre des résultats de formation de voies sur des blocs différents. Cette méthode est simple mais efficace et elle tire profit de l'hypothèse de stationnarité des sources, animées d'un mouvement global. L'efficacité de la méthode est évaluée en termes de performances d'imagerie acoustique sur des expériences de bruit de passage.

2.4.4.1 Principe de l'algorithme de correction

L'algorithme de correction de trajectoire se décline en trois étapes. Tout d'abord, un premier calcul de Beamforming-MS par bloc est réalisé pour chaque bloc indicé par k d'après l'équation (2.18). Cette première étape a pour but d'estimer tous les décalages de localisation des sources entre tous les couples de blocs temporels possibles. Ensuite, un critère est défini afin de sélectionner le bloc temporel correspondant à la localisation de référence des sources au sein de la grille de calcul. Enfin, les localisations de tous les autres blocs temporels seront recalées à la localisation de référence afin d'estimer la trajectoire corrigée.

Calcul des décalages spatiaux entre les résultats de Beamforming-MS

Le décalage spatial entre deux résultats de formation de voies correspondant à deux blocs différents k_1 et k_2 est estimé en calculant l'intercorrélacion spatiale entre les résultats de Beamforming-MS. En effet, avec l'hypothèse de stationnarité des sources, la carte de localisation doit être constante d'un bloc à un autre si la trajectoire réelle est connue parfaitement. Sur les deux blocs temporels considérés, les résultats de formation de voies utilisés sont définis sur une bande de fréquence \mathbb{F} composée des fréquences sources les plus énergétiques, *i.e.* caractérisées par un fort RSB. Par exemple, si le spectre d'une source contient des fréquences tonales (raies fréquentielles des machines internes), il convient alors d'intégrer ces fréquences dans la bande \mathbb{F} . De la même manière, si le spectre d'une source contient une composante large bande (sources hydroacoustiques), la bande fréquentielle à meilleur RSB doit être incluse dans la bande \mathbb{F} .

L'intégration sur la bande fréquentielle \mathbb{F} du résultat du Beamforming-MS par bloc au k -ième bloc temporel est :

$$\forall l \in [1, L], \quad \Gamma_{\text{BF}}^{\mathbb{F},k}(X_l(t^k)) = \sum_{f \in \mathbb{F}} \Gamma_{\text{BF}}^k(X_l(t^k), f) \quad (2.62)$$

avec $\Gamma_{\text{BF}}^k(X_l(t^k), f) = |p_{\text{BF}}^k(X_l(t^k), f)|^2$ le carré du Beamforming-MS au point $X_l(t^k)$ au k -ième bloc temporel à la fréquence f . Pour ce cas particulier d'antenne linéaire, les erreurs de trajectoire sont estimées comme des erreurs de trajectoire équivalentes selon l'axe x . Les erreurs de trajectoire selon y et selon z si elles existent, seront donc estimées de façon équivalente selon x . L'intercorrélacion spatiale selon x entre deux résultats de localisation de sources calculés par l'équation (2.62) pour deux blocs k_1 et k_2 est définie comme suit :

$$\text{Corr} \left[\Gamma_{\text{BF}}^{\mathbb{F},k_1}(X_l(t^{k_1})), \Gamma_{\text{BF}}^{\mathbb{F},k_2}(X_l(t^{k_2})) \right] (x) = \int_{\mathfrak{x}} \Gamma_{\text{BF}}^{\mathbb{F},k_1}(\mathfrak{x}) \Gamma_{\text{BF}}^{\mathbb{F},k_2}(\mathfrak{x} - x) d\mathfrak{x} \quad (2.63)$$

avec \mathfrak{x} une variable muette exprimée en mètres selon x . Le décalage de localisation $M_D(k_1, k_2)$ entre les résultats de localisation pour deux blocs k_1 et k_2 est calculé en mètres en repérant la position du maximum de la fonction d'intercorrélacion :

$$M_D(k_1, k_2) = \arg \max_x \text{Corr} \left[\Gamma_{\text{BF}}^{\mathbb{F},k_1}(X_l(t^{k_1})), \Gamma_{\text{BF}}^{\mathbb{F},k_2}(X_l(t^{k_2})) \right] (x) \quad (2.64)$$

$M_D(k_1, k_2)$ est l'élément (k_1, k_2) de la matrice des décalages \mathbf{M}_D , qui est une matrice de taille $K \times K$, et exprimée mathématiquement par :

$$\mathbf{M}_D = \begin{bmatrix} M_D(1,1) & \dots & M_D(1,K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_D(K,1) & \dots & M_D(K,K) \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Cette matrice est antisymétrique puisque le décalage spatial du résultat d'un bloc k_1 par rapport à celui d'un bloc k_2 est l'opposé du décalage du bloc k_2 par rapport au bloc k_1 , *i.e.*, $M_D(k_1, k_2) = -M_D(k_2, k_1)$.

Choix du bloc de référence

La matrice des décalages fournit une vision globale des décalages en mètres qui existent entre les résultats de localisation de sources pour tous les couples de blocs possibles et qui reflètent l'amplitude des erreurs de trajectographie. La deuxième étape de la méthode de correction de trajectographie est de déterminer quel bloc correspond à l'intervalle temporel durant lequel la trajectoire estimée correspond le mieux à la trajectoire réelle. Ce bloc est ainsi associé à une localisation dite *de référence* avec laquelle seront recalées toutes les autres localisations.

Tout d'abord, il est nécessaire de définir un critère de comparaison entre les résultats de décalage de localisation relatifs à un couple de blocs. Selon la résolution spatiale de la méthode de localisation de sources, nous pouvons supposer que deux résultats de localisation de sources présentant des localisations estimées distantes de moins de \mathfrak{V} mètres estiment la même localisation. Une version binaire \mathbf{M}_B de la matrice des décalages est alors calculée :

$$M_B(k_1, k_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } |M_D(k_1, k_2)| \leq \mathfrak{V} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.66)$$

Les blocs associés aux mêmes localisation en accord avec le précédent critère de comparaison sont alors groupés. Si $M_B(k_1, k_2) = 1$, alors k_2 appartient au groupe du bloc k_1 . Le bloc de référence peut être défini, par exemple, en utilisant la localisation la plus courante. Le bloc de référence k_r est donc l'un des blocs du plus grand groupe de blocs temporels. Il est à noter que le choix du bloc de référence parmi les blocs d'un même groupe n'impacte aucunement la qualité des résultats de localisation. Dans certains cas d'expérimentation de bruit de passage, la position du véhicule étudiée est parfaitement connue à un instant particulier, la localisation du véhicule au bloc temporel correspondant à cet instant particulier est alors considérée comme la localisation de référence.

Dans cette thèse, la localisation de référence est considérée comme étant la localisation la plus courante.

Correction de la trajectoire initialement estimée

Pour estimer la trajectoire corrigée, la ligne $M_D(k_r, k)$, $k \in [1, K]$ de la matrice des décalages

M_D correspondant au bloc k_r est considérée. Cette ligne contient les décalages de localisation en mètres entre chaque bloc et le bloc de référence k_r . La trajectoire *a priori* est notée $x_{\text{traj}}(t)$ et elle est corrigée de la manière suivante :

- l'abscisse de la trajectoire $x_{\text{traj}}(t^{k_r})$ à l'instant t^{k_r} correspondant à la localisation de référence est inchangée
- l'abscisse de la trajectoire $x_{\text{traj}}(t^k)$ à l'instant t^k correspondant au bloc k est corrigée par

$$\forall k \in [1, K], \quad \hat{x}_{\text{traj}}(t^k) = x_t(t^k) - M_D(k_r, k) \quad (2.67)$$

avec $\hat{x}_{\text{traj}}(t)$ la trajectoire corrigée.

2.4.4.2 Validations numériques et performances

Afin de valider l'amélioration des résultats d'imagerie acoustique par le pré-traitement de correction acoustique de trajectoire, une source en un point $S_1(t)$ émettant un bruit blanc filtré sur $[200\text{Hz}; 3000\text{Hz}]$ est simulée. La source passe au-dessus d'une antenne régulière linéaire de 17 hydrophones, espacés de 50cm , centrée en l'origine du repère cartésien. L'acquisition dure $T_{\text{acq}} = 10\text{s}$ et la source se déplace d'un point $S_1(0) = (-10\text{m}; 2,50\text{m}; +10\text{m})$ vers un point $S_1(T_{\text{acq}}) = (+10\text{m}; 2,50\text{m}; +10\text{m})$. Le mouvement de la source est rectiligne selon x et de vitesse $v(t)$ définie par :

- $v = 3\text{m.s}^{-1}$ sur $[0\text{s}; 5\text{s}]$ et sur $[8\text{s}; 10\text{s}]$
- $v = 0,33\text{m.s}^{-1}$ sur $[5\text{s}; 6,5\text{s}]$
- $v = 5,67\text{m.s}^{-1}$ sur $[6,5\text{s}; 8\text{s}]$

Les géométries du problème sont représentées par la figure 2.40. Le Beamforming-MS est

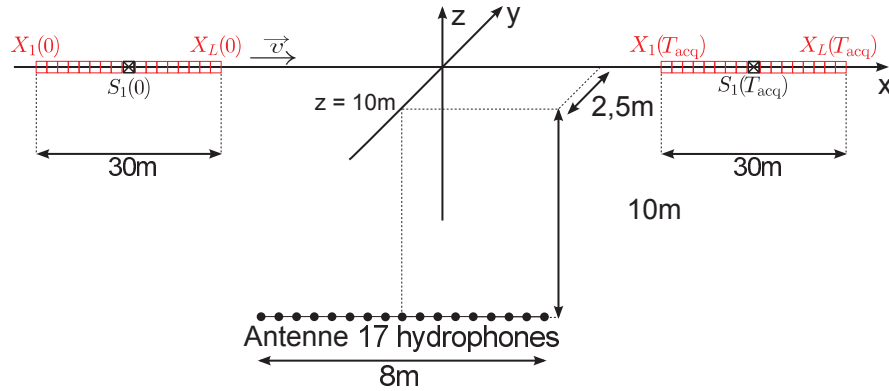


FIGURE 2.40 – Simulation d'une source de bruit blanc à vitesse non uniforme : Géométrie de la configuration simulée pour valider le traitement de correction acoustique de trajectographie.

calculé sur l'intervalle $[3\text{s}; 7\text{s}]$ correspondant à 79 blocs de durée $T = 100\text{ms}$, une trajectoire initiale rectiligne uniforme de vitesse $v = 3\text{m.s}^{-1}$ est définie comme *a priori* pour évaluer l'efficacité de la correction de trajectoire. La trajectoire initiale et la trajectoire réelle de la source sont représentées sur la figure 2.41.

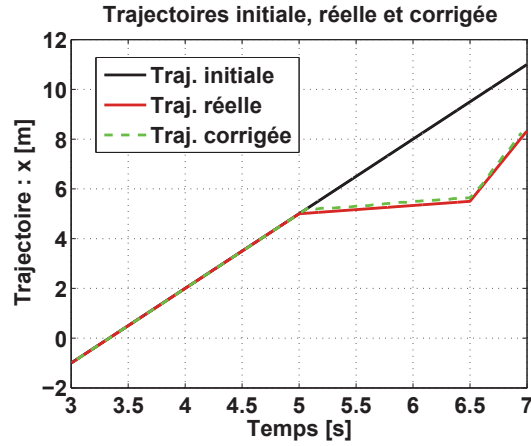


FIGURE 2.41 – Trajectoire initiale (—), trajectoire corrigée (—) et trajectoire réelle (—).

Calcul des décalage spatiaux entre les résultats de Beamforming-MS

Tout d'abord, les résultats de localisation sont calculés par Beamforming-MS indépendamment sur chaque bloc en utilisant la trajectoire initiale. La fonction d'intercorrélation spatiale (eq. (2.63)) est calculée pour les résultats de Beamforming-MS relatifs à toutes les paires de blocs possibles, sur toute la bande fréquentielle de travail. La matrice des décalages \mathbf{M}_D est ensuite remplie avec ces décalages spatiaux et est représentée sur la figure 2.42. Les éléments de \mathbf{M}_D sont indicés par les instants correspondants aux blocs. La matrice binaire \mathbf{M}_B est calculée en utilisant un paramètre de voisinage $\mathfrak{V} = 0,1m$ (eq. (2.66)), les paires de blocs qui partagent la même localisation correspondent aux éléments de \mathbf{M}_B valant 1. La matrice binaire est représentée sur la figure 2.42b. Selon le critère de sélection de la localisation la plus

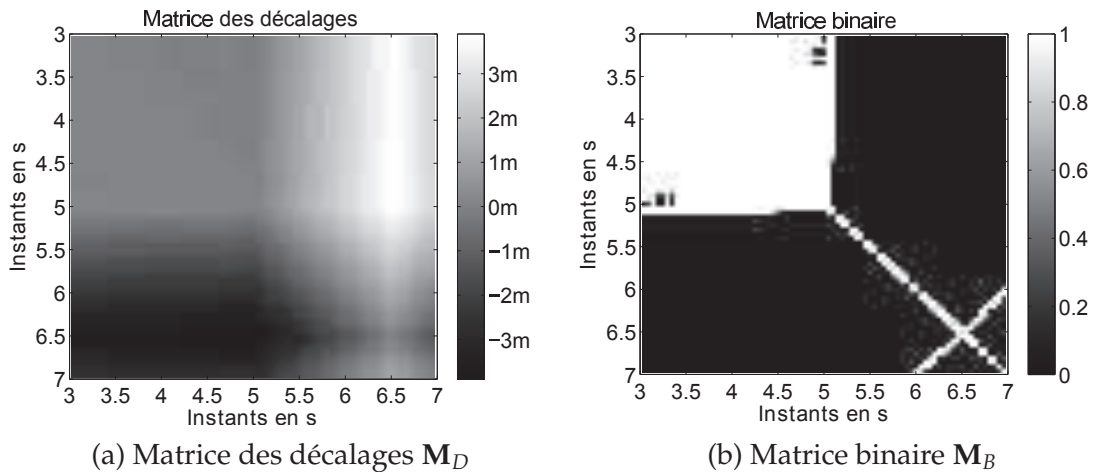


FIGURE 2.42 – Matrice des décalages \mathbf{M}_D contenant tous les décalages spatiaux entre localisations (a). Matrice binaire \mathbf{M}_B (b).

courante, le bloc de référence choisi est celui correspondant à $t^{k_r} = 4,1s$.

Correction de la trajectoire initiale

Les décalages spatiaux entre les résultats du Beamforming-MS sont calculés entre le bloc de référence et tous les autres blocs et ils fournissent une estimée des erreurs de trajectographie comme formulées par l'équation (2.67). La figure 2.41 représente la trajectoire initiale en noir, la trajectoire corrigée en tirets verts et la trajectoire réelle en rouge. Pour ce cas de simulation, la méthode de correction de trajectographie parvient à estimer une trajectoire corrigée égale à la trajectoire réelle avec une précision d'un pas de calcul, *i.e.* 5cm.

Pour évaluer l'efficacité de la procédure de correction de trajectographie sur les résultats de localisation de sources, les résultats de Beamforming-MS sont représentés pour la trajectoire initiale en noir, la trajectoire corrigée en tirets verts et la trajectoire réelle en rouge sur la figure 2.43, à la fréquence $f = 1500\text{Hz}$.

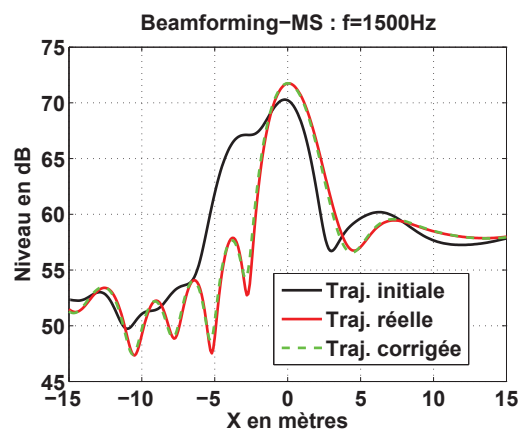


FIGURE 2.43 – Résultats de Beamforming-MS par bloc pour la trajectoire initiale (—), la trajectoire corrigée (—) et la trajectoire réelle (—) à la fréquence $f = 1500\text{Hz}$.

Les lobes secondaires dans les x positifs sont plus importants que dans les x négatifs car la source est vue avec un certain angle par l'antenne. La source théoriquement localisée au centre de la grille de calcul est bien localisée par le Beamforming-MS en utilisant les trois trajectoires. Les erreurs de trajectographie étalent la localisation de la source ponctuelle vers les x négatifs à cause du ralentissement (fig. 2.43, en noir), cela mène à la génération d'une source non physique localisée en $x = -3,2\text{m}$: l'interprétation du Beamforming-MS avec la trajectoire initiale est alors erronée.

D'après la table 2.5, les performances du Beamforming-MS (résolution, dynamique, localisation de la source) avec la trajectoire corrigée sont égales à celles obtenues avec la trajectoire réelle. Cette table montre également que lorsque la trajectoire *a priori* n'est pas corrigée, la dynamique de localisation est fortement réduite à la valeur de 3,2dB à la fréquence 1500 Hz. L'algorithme proposé améliore donc les performances du Beamforming-MS dégradés par les erreurs de trajectographie.

Trajectoire	Dynamique	Résolution	Erreur de localisation
Initiale	3,2dB	2,4m	Erreur sur \hat{S}_1 : -0,1m
Réelle	12,2dB	2,6m	Erreur sur \hat{S}_1 : 0,1m
Corrigée	12,2dB	2,6m	Erreur sur \hat{S}_1 : 0m

TABLE 2.5 – Performances de localisation à $f = 1500\text{Hz}$ du Beamforming-MS de la figure 2.43.

2.4.4.3 Conclusions

La méthode proposée de correction des erreurs de trajectographie a montré son efficacité pour corriger une mauvaise trajectoire *a priori* et cela a permis d'améliorer les performances du Beamforming-MS par bloc qui tendent vers les performances obtenues avec la connaissance exacte de la trajectoire. Une erreur sur la connaissance de la vitesse des sources selon x a été simulée, c'est une erreur typique d'une expérience de bruit de passage. La méthode de correction s'est révélée efficace pour ce type d'erreur. Pour ce type de mesures de bruit de passage d'un navire de surface au-dessus d'une antenne linéaire, les erreurs de trajectographie selon y et z (fig. 2.40) sont généralement de faibles amplitudes.

2.5 Conclusions

Ce chapitre a présenté les méthodes de localisation de sources et de contribution de sources qui ont été développées dans cette thèse pour l'imagerie acoustique sous-marine d'un navire de surface au passage.

Tout d'abord, une étude bibliographique des méthodes de localisation de sources fixes et en mouvement a montré que seul les méthodes de formation de voies étaient adaptées du fait de la mobilité des sources. La contribution de sources est ensuite réalisée par une méthode de déconvolution de la réponse d'antenne moyenne dans les résultats de Beamforming-MS. De plus, une étude de plusieurs géométries optimisées d'antenne linéaire a permis de choisir la géométrie régulière comme géométrie optimale au vu des contraintes matérielles de l'étude.

Une étude des performances de localisation de sources de la méthode de Beamforming-MS a montré que plusieurs erreurs de modèles telles que les erreurs de célérité, les erreurs de positionnement des capteurs pouvant exister en pratique affectaient peu les résultats de Beamforming-MS. Les erreurs de calibration qui sont des erreurs plus difficilement quantifiables, dégradent la dynamique et la résolution du Beamforming-MS. De plus, la dynamique de localisation du Beamforming-MS est dégradée par le bruit de mesure et par les effets de bord induits par la taille de la grille de calcul généralement grande dans les applications de bruit de passage. Les performances en localisation du Beamforming-MS ne

sont, en revanche, pas sensibles à la cohérence entre deux sources. Enfin, la résolution du Beamforming-MS est limitée en basse fréquence lorsque deux sources sont spatialement proches.

Une étude des performances des méthodes de déconvolution DAMAS-MS et SDM a montré que la méthode SDM présentait de meilleures performances en localisation et en contribution de sources, elle a donc été choisie de ce fait. Bien que la méthode SDM déconvolue correctement les résultats de Beamforming-MS, la résolution en basses fréquences est peu améliorée. Ces méthodes de déconvolution permettent d'accéder à la contribution des sources et d'améliorer la dynamique de localisation du Beamforming-MS. La méthode SDM s'est révélée peu sensible à la non vérification de l'hypothèse de sources fixes sur des blocs temporels de courte durée et sensible au bruit de mesure notamment au travers de la quantité de sources non physiques qu'elle reconstruit.

Enfin, au cours de ce travail de thèse, trois améliorations à la méthode de Beamforming-MS ont été proposées. La première amélioration est une nouvelle stratégie de pondération du Beamforming-MS pour résoudre le problème des effets de bord dus à la grande dimension de la grille de calcul. Cette pondération a permis d'obtenir une valeur d'estimateur du Beamforming-MS beaucoup plus proche de sa valeur théorique, améliorant ainsi la dynamique de localisation du Beamforming-MS et de la méthode SDM. La quantité de sources non physiques reconstruites par la méthode SDM a également été réduite. En revanche, cette pondération fait perdre le pouvoir quantitatif absolu de la méthode SDM. La deuxième amélioration de la méthode de Beamforming-MS a résolu le problème de la résolution de deux sources tonales et spatialement proches en basses fréquences. Cette amélioration consiste en un traitement passif d'antenne à ouverture synthétique. Ce traitement a montré une bonne robustesse vis-à-vis du bruit de mesure et des erreurs de trajectographie avec l'utilisation d'une stratégie de synchronisation court terme. Une dernière amélioration de la méthode de Beamforming-MS a permis de corriger des erreurs de trajectographie suivant la direction de l'antenne linéaire. Les erreurs de trajectographie sont des erreurs courantes en expérience de bruit de passage. Elles dégradent la dynamique de localisation et peuvent générer des sources non physiques dans les résultats de localisation. Cet algorithme a été validé sur une erreur de trajectographie typique dans un cas mono-source sans bruit de mesure, de meilleures performances en localisation telles qu'une meilleure dynamique ont été constatées. Cette dernière amélioration s'avère donc utile pour les cas de plusieurs sources.

Études expérimentales

Sommaire

3.1 Objectifs des campagnes de mesure de bruit de passage	131
3.1.1 Expérimentations à échelle réduite et facteurs de similitude	132
3.1.2 Campagnes de mesures du projet ARMADA	133
3.1.2.1 Expérimentation de sources fixes en eau	134
3.1.2.2 Expérimentations de bruit de passage	134
3.2 Campagne de mesures aériennes : Salle semi-anéchoïque	135
3.2.1 Protocole expérimental	136
3.2.2 Caractérisation de l'installation	138
3.2.2.1 Rapport Signal sur Bruit de fond de l'expérience	139
3.2.2.2 Trajectographie	141
3.2.3 Caractérisation des performances de l'antenne	143
3.2.4 Résultats expérimentaux	145
3.2.4.1 Application de la méthode initiale	147
3.2.4.2 Application de l'algorithme de correction de trajectographie	148
3.2.5 Conclusions	151
3.3 Campagne de mesures sous-marines : Lac de Castillon	151
3.3.1 Protocole expérimental	152
3.3.2 Caractérisation de l'installation	156
3.3.2.1 Trajectographie	156
3.3.2.2 Caractérisation des performances de l'antenne	157
3.3.3 Résultats expérimentaux	160
3.3.3.1 Stratégie d'analyse des mesures acoustiques de Castillon	160
3.3.3.2 Application de la méthode initiale	161
3.3.3.3 Application de l'algorithme d'antenne à ouverture synthétique	166
3.3.4 Conclusions	170
3.4 Conclusions et perspectives des expérimentations	170

3.1 Objectifs des campagnes de mesure de bruit de passage

Un des objectifs de la thèse est d'étudier la faisabilité de l'utilisation d'une antenne réduite pour l'imagerie acoustique d'un navire de surface au passage. Ces travaux ont abouti à

la conception d'un démonstrateur industriel. Un démonstrateur industriel d'imagerie acoustique est ici un ensemble constitué d'un prototype matériel, d'une antenne de mesures, et d'un prototype de logiciel intégrant les méthodes développées, permettant la localisation de sources et la contribution de sources.

Pour valider ce démonstrateur, plusieurs expérimentations ont été réalisées pour vérifier que les performances du démonstrateur sont en accord avec le cahier des charges dans la configuration industrielle visée, validant ainsi la faisabilité d'un tel système. Comme évoqué dans le chapitre 1, les expérimentations d'imagerie acoustique de navire de surface au passage avec une antenne d'hydrophones sont coûteuses à mettre en place. Afin de bien dimensionner le démonstrateur final pour qu'il respecte les performances d'imagerie acoustique désirées, il convient donc de réaliser plusieurs phases de test selon une complexité d'expérimentation croissante :

1. des simulations de sources acoustiques sous-marines typiques d'un navire de surface. Les résultats de localisation-contribution de sources sur ces données ont été présentés dans la sous-section 2.3.5.
2. une expérimentation à l'échelle en milieu aérien pour laquelle les coûts sont faibles par rapport à une expérimentation en eau
3. une expérimentation à l'échelle en milieu sous-marin favorable, par exemple avec une maquette de navire de surface en lac

Les simulations permettent de valider les performances des méthodes sur des sources synthétiques. De plus, l'environnement de mesures réel étant généralement différent de l'environnement idéal modélisé en simulation, il est possible d'évaluer l'effet sur les algorithmes d'imagerie acoustique de ces contraintes expérimentales, *i.e.* des erreurs sur le modèle (sous-section 2.3.2).

La mise en place d'expérimentation à échelle réduite permet d'avoir un environnement de mesures maîtrisé et d'identifier les contraintes expérimentales de la configuration de mesure.

3.1.1 Expérimentations à échelle réduite et facteurs de similitude

Les expérimentations à échelle réduite ont pour objectif d'étudier des phénomènes physiques semblables à ceux d'une expérimentation à échelle réelle en réduisant les dimensions géométriques de l'installation. Cette réduction de géométrie permet de réduire les coûts de mise en œuvre matérielle mais également de mieux maîtriser l'environnement de mesure. En effet, l'instrumentation de l'installation avec les moyens de mesures et la maîtrise de la trajectoire du véhicule au passage est plus facile dans le cas d'une expérience à échelle réduite. La maîtrise de l'environnement de mesures se traduit alors par une meilleure connaissance *a priori* du milieu de propagation en comparaison à l'expérimentation à échelle réelle. Les expérimentations à échelle réduite interviennent typiquement dans l'étude de faisabilité d'un système et permettent de qualifier les performances de celui-ci en environnement non simulé.

En hydroacoustique et en vibroacoustique, la mise à l'échelle d'une configuration expérimentale est réalisée en utilisant des facteurs de similitude. Ces facteurs de similitude sont des grandeurs adimensionnées caractéristiques d'une configuration expérimentale. Ainsi, deux configurations expérimentales sont *semblables* si leurs caractéristiques géométriques et physiques impliquent une même valeur de facteur de similitude [Blake 1984, Fournier 2009]. Les principaux facteurs de similitudes intervenant dans une expérience de bruit de passage de navire sont :

- le *nombre de Helmholtz* liant les dimensions caractéristiques d'une source à la longueur d'onde des ondes acoustiques qu'elle émet.

$$He = k.L_c \quad (3.1)$$

avec k le nombre d'onde des ondes acoustiques et L_c la longueur caractéristique de la source. Le nombre de Helmholtz a été utilisé pour le dimensionnement de l'expérimentation en air. Les distances ont été divisées par 10 et les fréquences de travail multipliées par 2.

- le *nombre de Mach* rendant compte de l'effet Doppler affectant la propagation acoustique d'une source mobile, avec v la vitesse de la source et c la célérité des ondes acoustiques dans le milieu de propagation :

$$\|\vec{Ma}\| = \frac{v}{c} \quad (3.2)$$

Cette dépendance à la célérité des ondes acoustiques permet notamment de dimensionner des expériences similaires en eau et en air. En effet, la vitesse de tractage des sources dans les expérimentations en air a été prise 5 fois plus petite que la vitesse de tractage dans les expérimentations de Castillon.

- le nombre de Froude caractérise la résistance qu'oppose l'eau au déplacement d'un navire, il dépend de l'accélération de pesanteur $g = 9,81 m.s^{-2}$, de la vitesse du navire v_{nav} et de la longueur du navire L_{nav} :

$$F_L = \frac{v_{nav}}{\sqrt{g.L_{nav}}} \quad (3.3)$$

Dans cette thèse, le nombre de Froude n'est pas utilisé pour le dimensionnement d'expérimentation mais il sera calculé dans l'annexe C pour caractériser des phénomènes hydrodynamiques tels que la brisure de la vague d'étrave.

3.1.2 Campagnes de mesures du projet ARMADA

Trois campagnes de mesures ont été réalisées au cours de cette thèse. Une expérimentation simple de sources fixes en eau a été réalisée dans le but d'évaluer les performances d'une antenne réduite en environnement marin. Deux expérimentations de bruit de passage ont été réalisées afin de valider les méthodes proposées dans cette thèse.

La campagne de mesures la plus réaliste a été réalisée au Site d'Essais Sonar et Acoustique du lac de Castillon appartenant à la DGA Techniques Navales (Alpes-de-Haute-Provence) dans le cadre du projet ARMADA. Cette campagne de mesures avait pour objectif la mesure du bruit de passage d'une maquette tractée à l'échelle 1/5 d'un navire de surface, à partir d'une antenne d'hydrophones alignée dans la direction du mouvement du navire.

3.1.2.1 Expérimentation de sources fixes en eau

Une expérimentation de sources acoustiques sous-marines et fixes a été réalisée au lac de Laffrey, à la base nautique de Cholonge, en Mai 2014. J'ai participé à l'organisation et la réalisation de cette expérimentation qui a mobilisé un effectif de cinq personnes à temps plein pendant une semaine. Cette campagne de mesures a permis de valider l'utilisation d'une antenne réduite pour réaliser des méthodes de traitement d'antenne. En effet, pour cette campagne de mesures, deux haut-parleurs sous-marins constituant les sources fixes et une antenne de 4 hydrophones ont été utilisés et sont représentés sur le schéma de la figure 3.1. L'embarcation porteuse des sources et l'embarcation porteuse de l'antenne ont été stabilisées en position fixe à l'aide de bouées de mouillage et de mâts de voile (Fig. 3.1).

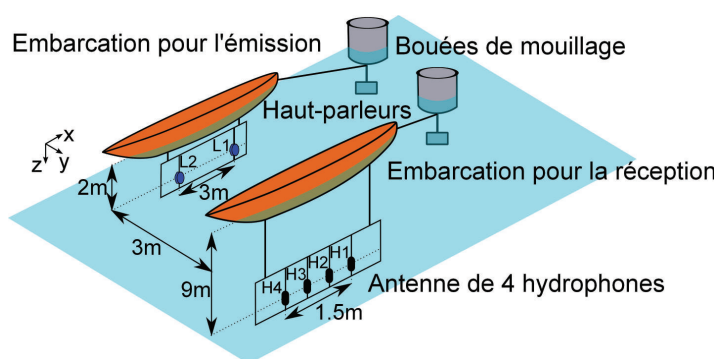


FIGURE 3.1 – Configuration expérimentale pour l'étude de sources fixes au lac de Laffrey.

Des expérimentations de bruit de passage n'ont pas pu être réalisées au lac de Laffrey car aucun moyen de trajectographie suffisamment précis n'était disponible. De plus, lors de cette expérimentation simple, le matériel ne permettait pas de réaliser des configurations expérimentales de sources artificielles en mouvement représentatives de celles d'un navire de surface.

3.1.2.2 Expérimentations de bruit de passage

Une première campagne de mesures de validation aérienne, à l'échelle de la campagne de mesures au lac de Castillon, a été mise en place dans la salle semi-anéchoïque de la société MicrodB du groupe Vibratec (Rhône-Alpes), en Août 2014. J'ai réalisé cette expérience

de trois jours dans le but d'évaluer les performances de la méthode initiale et des améliorations proposées dans le chapitre 2. Un dispositif de tractage semblable à celui existant au lac de Castillon a été conçu et a été équipé d'un système de trajectographie identique à celui utilisé pour les expérimentations au lac de Castillon. Ce mécanisme de tractage et de trajectographie à échelle réduite a permis d'avoir une trajectographie précise. Les dimensions de l'expérimentation en air ont été réduites afin de conserver un nombre de Helmholtz (équ. (3.1)) identique à celui des expériences prévues à Castillon. Ainsi, les fréquences de travail ont été multipliées par deux et les distances ont été divisées par dix. Les vitesses de tractage ont été divisées par 5 afin de rendre compte du même effet Doppler en air qu'en eau, en vertu de la conservation du nombre de Mach (équ. (3.2)).

La seconde expérimentation du projet ARMADA est une campagne de mesures de bruit de passage qui a lieu au mois de Janvier 2015 au Site d'Essais Sonar et Acoustique du lac de Castillon de la DGA Techniques navales dans le but d'acquérir une base de données expérimentales de sources acoustiques mobiles en environnement sous-marin. Cette campagne de mesures d'une durée d'un mois a mobilisé un effectif d'environ 10 personnes de la DGA Techniques navales au cours des deux semaines de mesures. J'ai été le responsable de la réalisation au cours de cette campagne de mesures et j'ai pu valider la faisabilité de la méthode initiale et de ses améliorations. Concernant le dispositif expérimental, une maquette de frégate "Lafayette" à l'échelle 1/5 d'une longueur d'environ 21,5 mètres et d'un poids d'environ 11 tonnes a été tractée. Des sources excitatrices artificielles ont été instrumentées à son bord : des sources ponctuelles (pots vibrants) et des sources étendues (haut-parleurs).

Dans ce chapitre, les deux expérimentations de bruit de passage qui ont été réalisées à échelle réduite sont présentées afin de valider les méthodes de localisation de sources et de contribution de sources proposées dans cette thèse. Les méthodes de localisation-contribution de sources sont ensuite appliquées pour l'analyse de sources acoustiques naturelles. Ainsi, l'annexe C présente une étude des sources hydroacoustiques propres à la maquette AMANDA et associées à son mouvement dans l'eau.

3.2 Campagne de mesures aériennes : Salle semi-anéchoïque

Cette section présente l'expérimentation de validation aérienne en salle semi-anéchoïque réalisée au cours de cette thèse. Dans cet environnement aérien, les conditions d'expérimentation sont très bien maîtrisées et cette expérimentation a permis de mettre en lumière les difficultés expérimentales de ce type de mesure.

Dans ce qui suit, nous présentons d'abord le protocole expérimental mis en œuvre pour cette expérimentation. Ensuite, l'installation est caractérisée par une estimation du rapport signal sur bruit des mesures et la méthode de trajectographie initiale est détaillée. La localisation des sources par Beamforming-MS et la contribution des sources après déconvolution par SDM avec l'antenne de mesures sont réalisées et sont comparées à la simulation. Enfin, nous présentons une application pratique de l'algorithme de correction acoustique de

trajectoire proposée dans la sous-section 2.4.4.

3.2.1 Protocole expérimental

Cette sous-section présente le protocole expérimental utilisé pour réaliser cette expérimentation de bruit de passage en air. Ce protocole a été construit afin de reproduire au mieux à l'échelle réduite les conditions d'expérimentation des mesures au lac de Castillon.

La mise en œuvre de l'expérience est schématisée sur la Figure 3.2. L'ensemble des sources est constitué d'un mobile en bois transportant deux haut-parleurs, ce mobile était tracté sur un rail de guidage. Le repère absolu de l'expérience est celui de l'antenne. Les sources sont animées d'un mouvement rectiligne selon l'axe x et évoluent sur la droite située à l'intersection des plans $y = 20\text{cm}$ et $z = +1\text{m}$.

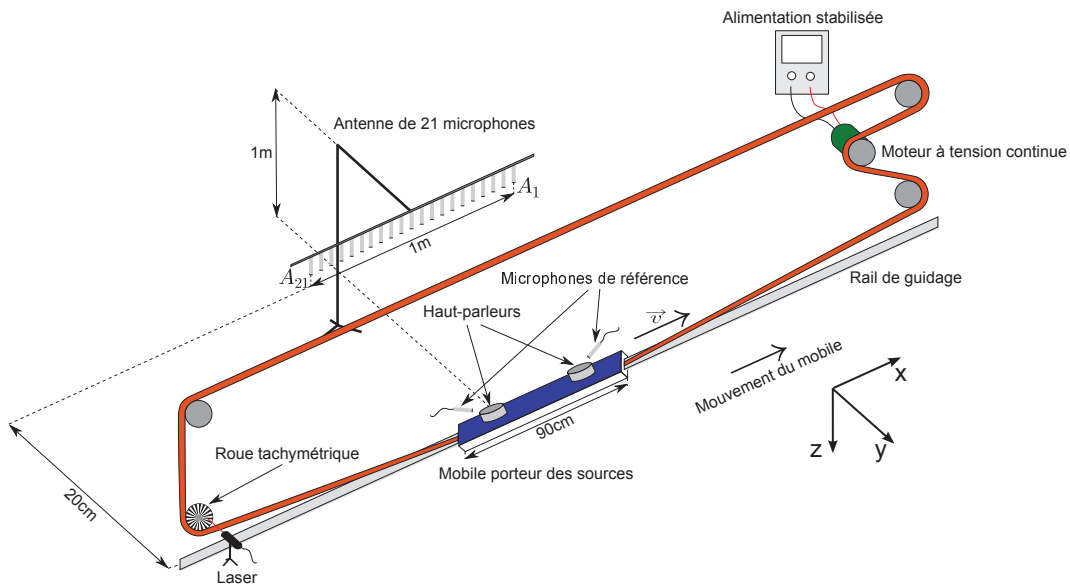


FIGURE 3.2 – Configuration expérimentale pour l'étude en air de sources mobiles dans la salle semi-anéchoïque de MicrodB.

L'installation se décompose en trois éléments : les équipements pour l'émission acoustique, le système de tractage et les équipements pour l'acquisition acoustique et tachymétrique.

Équipements pour l'émission acoustique

Les sources acoustiques sont constituées de deux haut-parleurs autonomes montés sur un mobile en bois de dimension $90\text{cm} \times 9\text{cm}$ comme le représente la figure 3.3. Deux microphones de référence sont placés à proximité des sources.

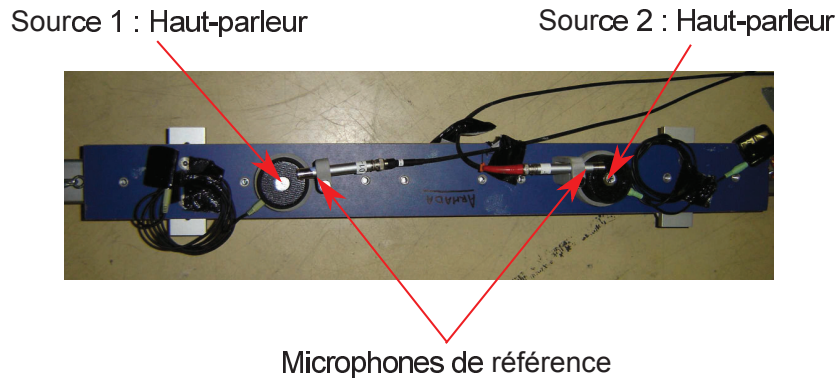


FIGURE 3.3 – Sources acoustiques : Hauts-parleurs autonomes montés sur un mobile en bois.

Système de mise en mouvement des sources

Dans cette expérience de bruit de passage, le système de mise en mouvement des sources est la partie la plus difficile à mettre en œuvre pour maîtriser au maximum la trajectoire des sources. Le mobile porteur des sources est tracté sur un rail de guidage de 7,50 mètres de long comme le montre la figure 3.4. Une cordelette rigide a été choisie pour le tractage du mobile selon des critères d'élasticité dans le but d'assurer au maximum la constance de la vitesse du mobile tracté. Un moteur à tension continue pilotant la rotation d'une poulie permet de délivrer une vitesse constante au mobile, comme le montre la figure 3.5a. Les vitesses de tractages ont été choisies entre $0,4m.s^{-1}$ et $1m.s^{-1}$, ce qui correspond aux mêmes nombres de Mach (éq. (3.2)) que ceux de l'expérimentation au lac de Castillon.

Équipements pour l'acquisition acoustique et tachymétrique

Des mesures acoustiques et des mesures tachymétriques ont été réalisées dans cette expérience de bruit de passage. Ce sont les données d'entrée des algorithmes de Beamforming-MS et de la méthode de déconvolution SDM. Toutes ces mesures sont synchronisées en utilisant un frontal d'acquisition. Cette synchronisation est nécessaire pour avoir une estimée de la trajectographie du mobile porteur des sources pour la localisation de sources mobiles par Beamforming-MS.

Mesures acoustiques

L'antenne de mesure est linéaire, régulière et constituée de 21 microphones espacés de 5cm. Afin d'être représentatif des expériences de Castillon, seul les 9 microphones centraux de l'antenne sont utilisés pour la validation des méthodes de localisation de sources. Elle a une bande passante de $[850Hz, 3400Hz]$, les fréquences étant doublées par rapport à la configuration du lac de Castillon pour conserver les facteurs de similitude. Ces mesures de pressions sont les données d'entrée de l'algorithme de localisation de sources par Beamforming-MS. Elles sont enregistrées avec une fréquence d'échantillonnage de $25600Hz$.

Mesures tachymétriques

Afin d'estimer la trajectographie des sources, une mesure tachymétrique est réalisée et syn-

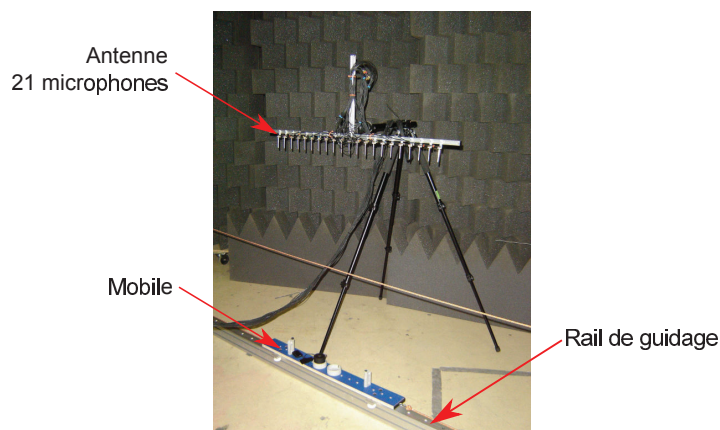


FIGURE 3.4 – Antenne de mesure de 21 microphones de réception.

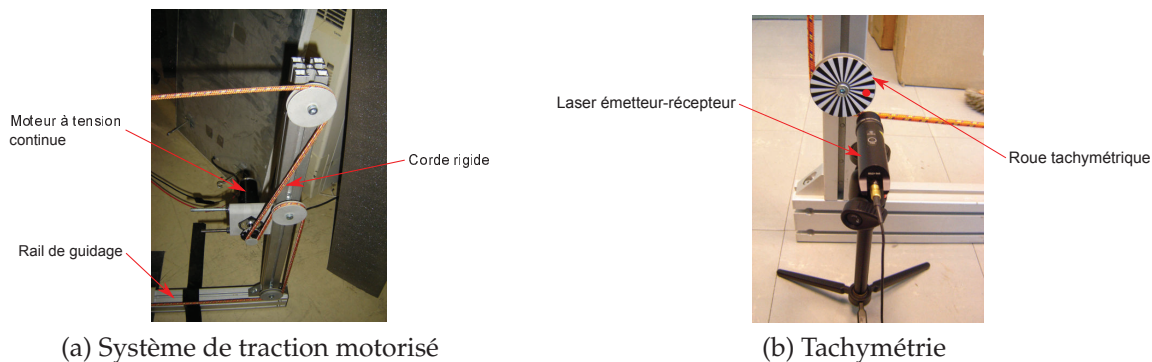


FIGURE 3.5 – Matériel spécifique à l'étude du bruit de passage : Système de traction des sources par un moteur à alimentation continue (a) et mesure tachymétrique (b).

chronisée aux mesures acoustiques. Pour cette mesure, une roue tachymétrique de rayon 3 centimètres divisée en 40 secteurs angulaires, qui sont alternativement noirs et blancs, est fixée à une poulie intervenant dans le mouvement du mobile porteur des sources, comme représenté sur la figure 3.5b. Un pointeur laser émetteur et récepteur est focalisé sur la roue tachymétrique. Au passage des secteurs noirs et blancs, il délivre un signal de tension continue de type créneau au frontal. Cette tension est transformée en tours par seconde puis en mètre par seconde selon la direction x dans le cas présent de mouvement rectiligne.

3.2.2 Caractérisation de l'installation

Les choix de conception mécanique pour reproduire à échelle réduite le système de tracage du lac de Castillon engendrent des imprévus mécaniques et acoustiques dont il faut caractériser l'impact sur les mesures acoustiques et tachymétriques. Si ces imprévus mécaniques ou acoustiques perturbent de façon importante les mesures, il faut prévoir des dispositifs pour réduire ces effets d'installation.

Le bruit de fond de l'expérience de bruit de passage est donc d'abord étudié. Puis, l'al-

gorithme utilisé pour la trajectographie du mobile porteur des sources est détaillé.

3.2.2.1 Rapport Signal sur Bruit de fond de l'expérience

Pour cette expérience de bruit de passage, nous définissons le bruit de fond de l'expérience comme étant le bruit mesuré par les microphones de l'antenne lorsque le tractage fonctionne et que les sources sont éteintes. Le Rapport Signal Sur Bruit au niveau d'un microphone est alors défini comme le rapport entre l'énergie du signal mesuré par un microphone de l'antenne, lorsque les sources sont allumées et que le système de tractage ne fonctionne pas, et l'énergie du bruit de fond mesuré par ce microphone. En pratique, seule une estimée du RSB est disponible car les signaux des sources n'ont pas été mesurés avec le système de tractage éteint. Nous estimerons donc l'énergie du signal à partir du signal mesuré par un microphone de l'antenne lorsque les sources sont allumées et tractées. Lorsque les sources sont allumées et tractées, le signal mesuré par un microphone contient le signal d'intérêt et le bruit de mesure supposé additif. Ainsi, l'écart entre l'autospectre du signal mesuré lorsque les sources sont allumées et tractées et l'autospectre du signal mesuré lorsque les sources sont éteintes et tractées :

- correspond à un RSB de 0 dB, lorsqu'il est égal à 3dB
- correspond à un RSB négatif dont la valeur ne peut être estimée, lorsqu'il est inférieur à 3dB
- correspond à un RSB positif dont la valeur est proche de l'écart entre les autospectres, lorsque cet écart est supérieur à 3 dB

Bruit de fond de l'expérience

Les contacts entre les roues en plastique du mobile et le rail de guidage en aluminium contribuent au bruit de fond de manière prépondérante. Pour cette étude, le mobile est tracté et toutes les sources du mobile sont éteintes. La Figure 3.6a représente la pression temporelle mesurée par le microphone A_{11} (voir position sur la figure 3.2) au cours de la trajectoire du mobile pour une tension continue d'alimentation du moteur de 10 volts. La Figure 3.6b représente la pression temporelle mesurée par le microphone A_{11} au cours de la trajectoire du mobile pour une tension continue d'alimentation du moteur de 14 volts.

Dans une étude qui n'est pas présentée ici, nous avons montré que les événements impulsifs du bruit d'installation sont répétables et bien définis spatialement puisqu'ils correspondent aux passages du train de roues avant et du train de roues arrière au niveau des jonctions entre les rails. Le rail de guidage est constitué de trois tronçons de rails mis bout à bout, le contact roue-rail génère donc six impulsions dans la pression acoustique mesurée par les microphones. Les amplitudes de ces impulsions sont proportionnelles avec la vitesse du mobile (fig. 3.6) : de la figure 3.6a à la figure 3.6b, la vitesse du mobile et les amplitudes des impulsions ont doublé.

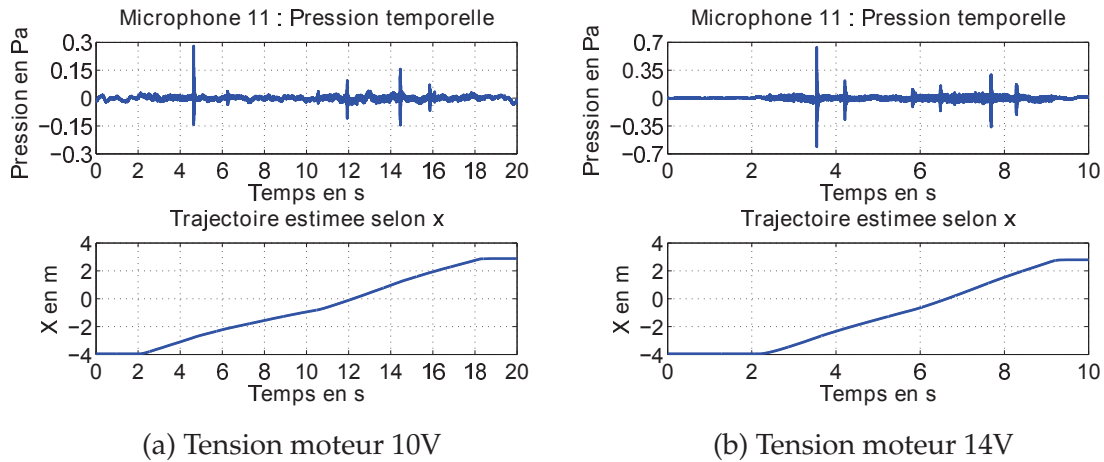


FIGURE 3.6 – Étude du bruit de contact roue-rail (bruit de fond) : Pression temporelle mesurée par le microphone A_{11} de l’antenne sans source allumée et trajectoire du centre du mobile correspondante.

Rapport Signal sur Bruit de fond

Il est nécessaire d’évaluer le rapport signal sur bruit pour ces mesures afin d’évaluer les performances attendues des méthodes de localisation de sources, notamment en termes de dynamique.

Dans les sous-sections 3.2.3 et 3.2.4, deux configurations expérimentales seront étudiées :

- une configuration d’une source de bruit blanc pour l’étude des performances de l’antenne de mesure (sous-section 3.2.3)
- une configuration de deux sources de bruit blanc pour l’application de la méthode initiale et la méthode de correction de trajectoire (sous-section 3.2.4).

La figure 3.7 représente l’autospectre du signal mesuré par le microphone A_{11} lorsque les sources sont allumées et tractées en trait continu et l’autospectre du signal mesuré par le microphone A_{11} lorsque les sources sont éteintes et que le système de tractage fonctionne en tirets.

La figure 3.7a représente ces autospectres pour la configuration expérimentale avec une source. La figure 3.7b représente ces autospectres pour la configuration expérimentale de deux sources. Ces autospectres sont calculés en considérant l’intervalle du signal temporel mesuré par le microphone A_{11} correspondant à la portion de trajectoire $[-0,5m; +0,5m]$ du centre du mobile porteur des sources. La figure 3.7a montre que, pour le cas d’une source, le RSB est supérieur à 15dB sur toute la bande fréquentielle $[1000Hz; 3000Hz]$ excepté sur la bande fréquentielle $[1100Hz; 1300Hz]$. En effet, le haut-parleur utilisé comme source acoustique n’est pas efficace sur la bande $[1100Hz; 1300Hz]$, cela s’observe par les creux d’atténuation dans l’autospectre du signal mesuré par le microphone A_{11} , représenté en trait continu sur la figure 3.7a.

La figure 3.7b montre que, pour le cas de deux sources, le RSB est supérieur à 15dB sur

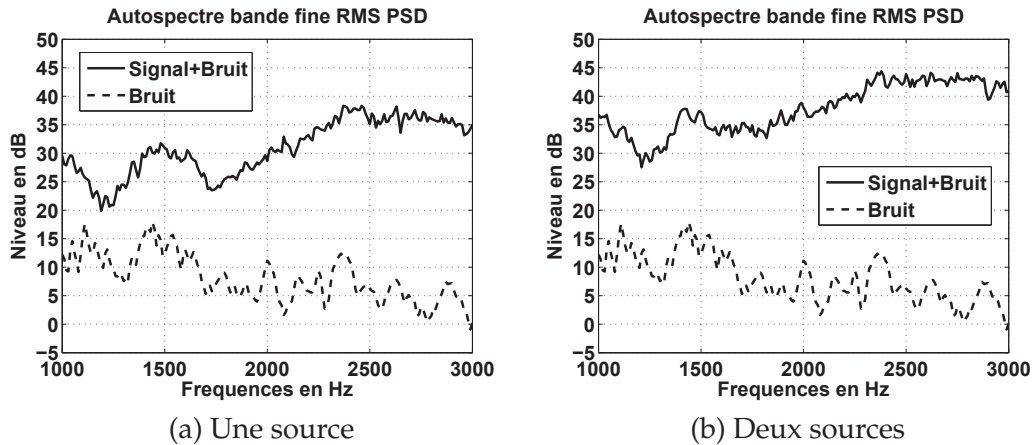


FIGURE 3.7 – Rapport signal sur bruit de fond des mesures : Les autospectres de la pression mesurée par le microphone A_{11} sont représentés sans source allumée en tirets et avec sources allumées en trait continu pour la configuration d’une source (a) et pour la configuration de deux sources (b).

toute la bande fréquentielle $[1000\text{Hz}; 3000\text{Hz}]$. Nous verrons par la suite que la dynamique de localisation du Beamforming-MS par cette antenne de 9 microphones est d’environ 12dB. Par conséquent, le RSB étant du même ordre de grandeur que la dynamique de localisation, le bruit de mesure ne perturbera pas les mesures sur toute la bande fréquentielle d’intérêt.

3.2.2.2 Trajectographie

Dans cette expérience de sources mobiles avec système de tractage motorisé à échelle réduite (Fig. 3.2), la méthode d’estimation de la trajectoire du mobile est basée sur l’utilisation d’une roue tachymétrique montée sur une poulie intervenant dans le système de tractage. Un pointeur laser émetteur-récepteur est focalisé sur la roue tachymétrique comme le montre la figure 3.5b. Lorsque le laser balaie les secteurs angulaires noirs et blancs le récepteur laser transmet une tension continue crénelée (Fig. 3.8) au frontal d’acquisition. Une tension positive est enregistrée lorsque le pointeur laser balaie un secteur angulaire blanc.

Pour convertir cette donnée en information de trajectoire, un simple détecteur de fronts est utilisé, il enregistre les instants de franchissement d’une valeur de tension seuil définie empiriquement. Le seuil de tension est ici choisi égal à -0,08 volts. La durée Δt entre un front montant et un front descendant détectés successivement correspond au parcours d’un arc de cercle (Fig. 3.8) de longueur $\Delta l = \frac{2\pi \cdot 0,03}{40} = 4,7\text{mm}$. Deux informations de trajectographie se déduisent donc de cette conversion :

- Position : le mobile a parcouru Δl pendant la durée Δt correspondant à un secteur angulaire
- Vitesse : le mobile s’est déplacé à vitesse supposée constante $v(t) = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ pendant Δt correspondant à un secteur angulaire

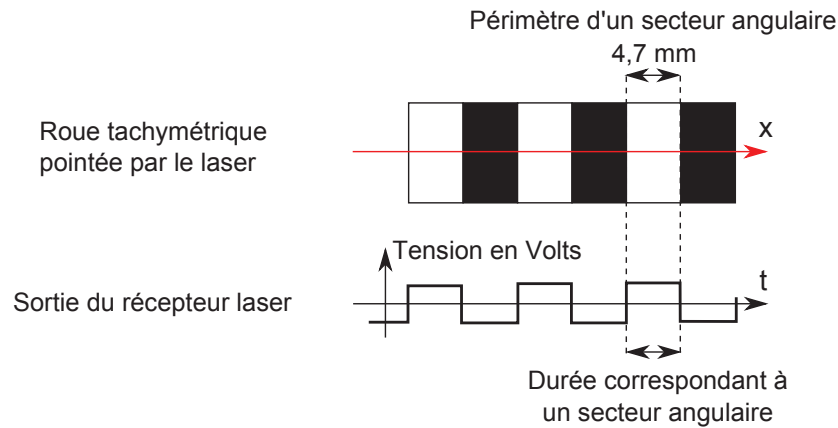


FIGURE 3.8 – Schéma de l'émission du pointeur laser sur la roue tachymétrique "dépliée" (en haut). Tension en sortie du récepteur du pointeur laser (en bas).

Aucun glissement de la cordelette sur la poulie instrumentée par la roue tachymétrique n'a été observé, la trajectoire est donc théoriquement précise à un arc de cercle près à savoir $\pm 4,7\text{mm}$. Dépendant des enregistrements, la trajectoire du mobile a été arrêtée lorsque le bord droit du mobile a parcouru environ $6,5\text{m}$. La figure 3.9 présente le dépouillement des mesures tachymétriques de la configuration expérimentale permettant d'obtenir une estimée de la trajectographie.

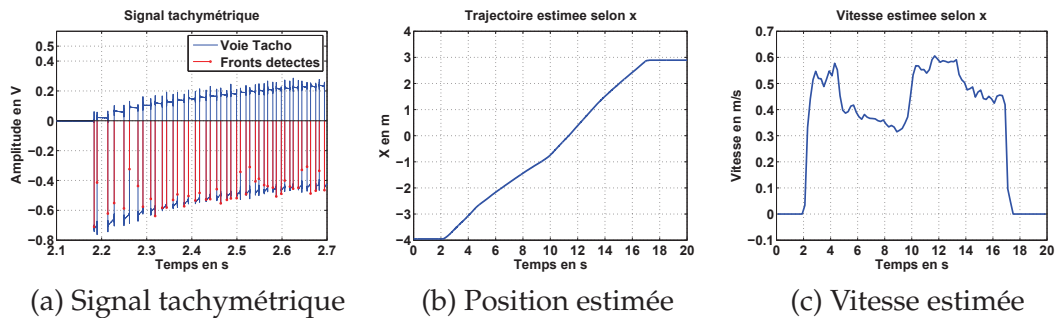


FIGURE 3.9 – Configuration expérimentale avec une tension continue de 10V alimentant le moteur : Signal tachymétrique délivré par le laser tachomètre (a), trajectoire estimée selon x (b) et vitesse instantanée estimée (c).

Un ralentissement temporaire du mobile est observé au cours de la trajectoire du mobile autour du temps $t = 10\text{s}$. Sur la plage $[2\text{s}; 9\text{s}]$ (portion de trajectoire $[-4\text{m}; -1\text{m}]$), la vitesse est de $0,4\text{m.s}^{-1} \pm 0,1\text{m.s}^{-1}$ et, sur la plage $[9\text{s}; 17\text{s}]$ (portion de trajectoire $[-1\text{m}; 3\text{m}]$), la vitesse est de $0,5\text{m.s}^{-1} \pm 0,1\text{m.s}^{-1}$.

3.2.3 Caractérisation des performances de l'antenne

Afin de caractériser acoustiquement l'expérience, les performances mesurées de l'antenne sont comparées aux performances de l'antenne obtenues en simulation. Les performances de l'antenne sont ici évaluées en termes de dynamique et de résolution du Beamforming-MS en configuration de sources mobiles. Une source de bruit blanc située en un point S_2 à $x = +15\text{cm}$ du centre du mobile porteur des sources est utilisée pour caractériser les performances expérimentales de l'antenne sur la bande de fréquences $[500\text{Hz}; 3000\text{Hz}]$. La configuration expérimentale utilisée pour cette caractérisation est présentée dans le tableau 3.1.

Configuration expérimentale

- Célérité des ondes acoustiques : $c = 345\text{m.s}^{-1}$
- Durée d'acquisition $T_{\text{acq}} = 20\text{s}$
- Fréquence d'échantillonnage : 25600Hz
- Résolution fréquentielle : $\Delta f = 10\text{Hz}$ (bloc temporel de durée $T = 100\text{ms}$)
- Mobile porteur de sources à la vitesse $v \approx 0,5\text{m.s}^{-1}$
- Source S_2 de bruit blanc positionnée à $+15\text{cm}$ par rapport au centre du mobile
- Grille de calcul $\mathbf{x}(t) = [X_1(t), \dots, X_L(t)]^T$ de longueur 4m centrée sur le mobile à chaque bloc
- Trajectoire du centre du mobile selon x : $x(t) = -3,95\text{m} + v.t$
- Antenne linéaire régulière de 9 microphones espacés de 5cm en x , centrée en l'origine du repère
- Intervalle d'étude $[10,79\text{s}; 12,25\text{s}]$
- Nombre de blocs utilisés pour le calcul : 29 blocs avec un recouvrement de 50%

TABLE 3.1 – Configuration expérimentale pour la comparaison des performances expérimentales et théoriques de l'antenne.

Dans cette configuration expérimentale, nous faisons le choix d'une tension d'alimentation continue du moteur de 10V , ce qui correspond approximativement à une vitesse de tractage égale environ à $v = 0,5\text{m.s}^{-1}$. Cette vitesse est associée à un nombre de Mach égal à $\|\overline{Ma}\| = 1,45 \cdot 10^{-3}$ (éq. (3.2)), ce qui permet de vérifier les hypothèses pour l'application du Beamforming-MS par bloc, évoquées dans l'introduction de la section 2.3.1. De plus, ce nombre de Mach sera utilisé dans la configuration en eau.

Pour cette configuration expérimentale, nous appliquons la méthode de Beamforming-MS par bloc sur 29 blocs temporels. Les cartes distance-fréquence des résultats du Beamforming-MS sont représentées sur le plan $[-2\text{m}; +2\text{m}] \times [500\text{Hz}; 3000\text{Hz}]$ sur la figure 3.11a, pour la simulation d'une source de bruit blanc sans bruit de mesure, et sur la figure 3.11b pour la mesure correspondante.

En comparant les cartographies acoustiques de la figure 3.11, on constate que le résultat

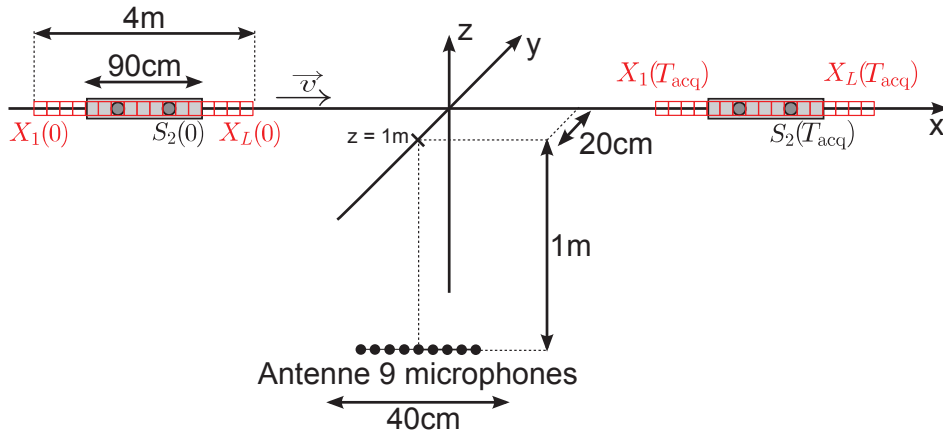


FIGURE 3.10 – Configuration expérimentale pour la caractérisation des performances de l'antenne de 9 microphones.

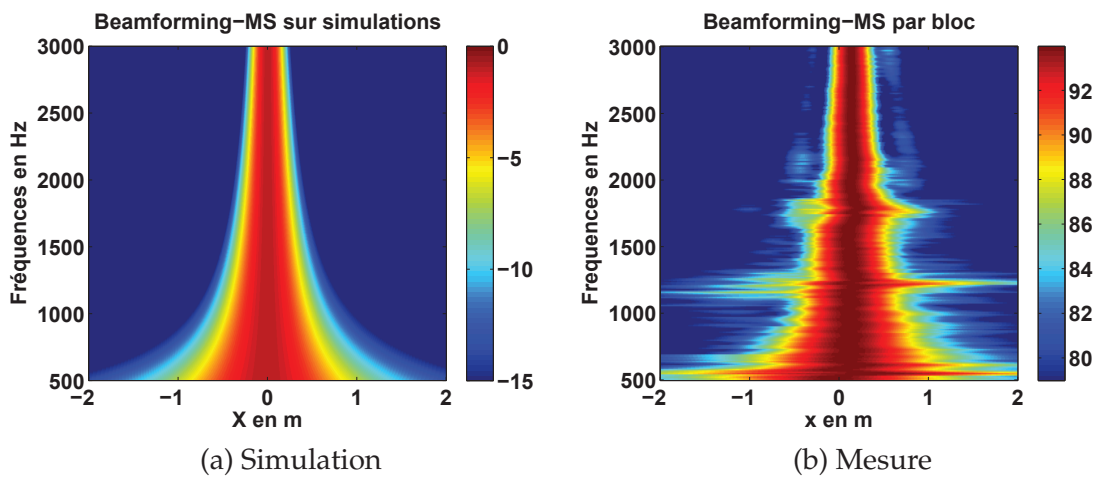


FIGURE 3.11 – Résultat de Beamforming-MS d'une source de bruit blanc en simulations (a) et en decibels (équ. 2.10) en mesure (b).

du Beamforming-MS sur la mesure est proche de celui prévu en simulation. Il présente une bonne dynamique de localisation grâce à un bon RSB sur la bande fréquentielle de travail [1500Hz;3000Hz]. Cependant, des dégradations de la résolution et de la dynamique par rapport à la simulation existent sur la bande fréquentielle [1100Hz;1300Hz] sur laquelle le RSB diminue à 5 dB (fig. 3.7a) et pour les fréquences autour de 1700 Hz.

Afin d'évaluer quantitativement les performances en termes de résolution et de dynamique, la figure 3.12a représente la résolution du Beamforming-MS obtenue en simulation en tirets et la résolution du Beamforming-MS obtenue en mesure en trait continu. Sur la bande fréquentielle [2000Hz;3000Hz], la résolution obtenue en mesure est égale à la résolution obtenue en simulation avec des erreurs inférieures à 5 centimètres. Cette distance qui correspond au déplacement des sources au cours d'un bloc temporel de durée $T = 100ms$

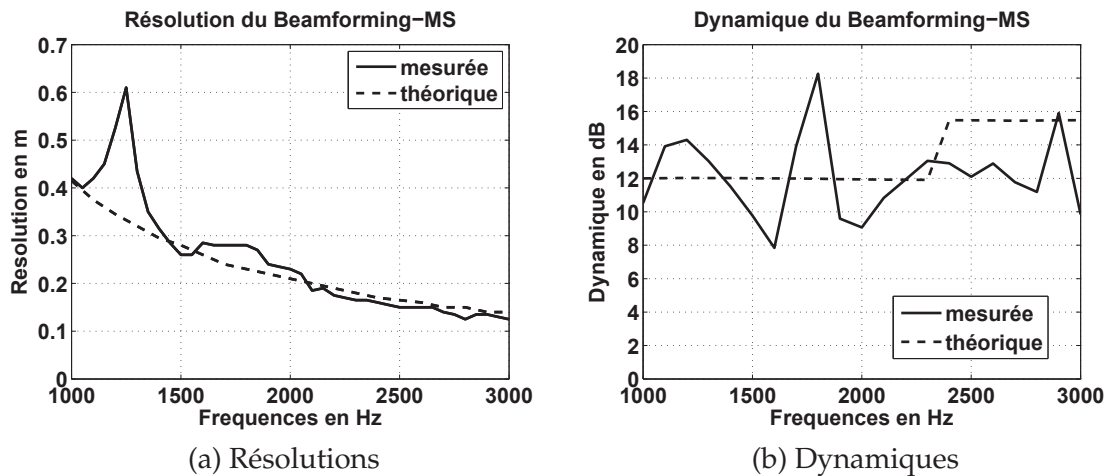


FIGURE 3.12 – Comparaison des résolutions (a) et des dynamiques (b) de localisation du Beamforming-MS d’une source simulée en tirets et du Beamforming-MS d’une source mesurée en trait continu.

est l’incertitude de localisation induite par le Beamforming-MS par bloc. La prédiction des performances de l’antenne de mesure par les simulations est donc validée. En revanche, sur la bande fréquentielle $[1000\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$, la résolution obtenue en mesure présente un écart, entre 5 à 25 centimètres, avec la résolution obtenue en simulation. Les fréquences auxquelles l’écart de résolution est le plus grand sont les fréquences des bandes identifiées comme problématiques précédemment, *i.e.* $[1100\text{Hz}; 1300\text{Hz}]$ et les fréquences autour de 1700Hz. La dégradation de la résolution dans ces bandes fréquentielles va donc réduire la capacité de l’antenne à séparer des sources spatialement proches.

La figure 3.12b présente la dynamique de localisation du Beamforming-MS obtenue en simulation en tirets et la résolution du Beamforming-MS obtenue en mesure en trait continu. La dynamique de localisation en mesure varie autour de la valeur obtenue en simulations, selon la fréquence. Elle reste cependant du même ordre de grandeur, entre 8 dB et 15 dB. Des précautions seront donc à prendre lorsque l’on étudiera des sources de niveaux différents.

3.2.4 Résultats expérimentaux

Nous présentons maintenant les résultats de la méthode initiale et de ses améliorations pour la configuration de deux sources de bruit blanc espacées de 60 centimètres selon x . La configuration expérimentale est présentée dans la table 3.2 et les géométries de mesure sont représentées sur la figure 3.13.

Configuration expérimentale

- Célérité des ondes acoustiques : $c = 345m.s^{-1}$
- Durée d'acquisition $T_{acq} = 20s$
- Fréquence d'échantillonnage : $25600Hz$
- Résolution fréquentielle : $\Delta f = 10Hz$ (bloc temporel de durée $T = 100ms$)
- Mobile porteur de sources à la vitesse $v \approx 0,5m.s^{-1}$
- Source S_1 de bruit blanc positionnée à $-30cm$ par rapport au centre du mobile
- Source S_2 de bruit blanc positionnée à $+30cm$ par rapport au centre du mobile
- Grille de calcul $\mathbf{x}(t) = [X_1(t), \dots, X_L(t)]^T$ de longueur $4m$ centrée sur le mobile à chaque instant
- Antenne linéaire régulière de 9 microphones espacés de $5cm$ en x , centrée en l'origine du repère

Paramètres pour l'application de la méthode initiale

- Portion de trajectoire du centre du mobile $[-0,75m; +0,75m]$, portion de trajectoire parcourue en 2,62 secondes avec une vitesse uniforme
- Nombre de blocs utilisés pour le calcul : 52 blocs avec un recouvrement de 50%

Paramètres pour l'application de la correction de la trajectographie

- Portion de trajectoire du centre du mobile $[-1,2m; +0m]$, portion de trajectoire parcourue en 2,09 secondes avec ralentissement
- Nombre de blocs utilisés pour le calcul : 41 blocs avec un recouvrement de 50%

TABLE 3.2 – Configuration expérimentale pour la comparaison des performances expérimentales et théoriques de l'antenne.

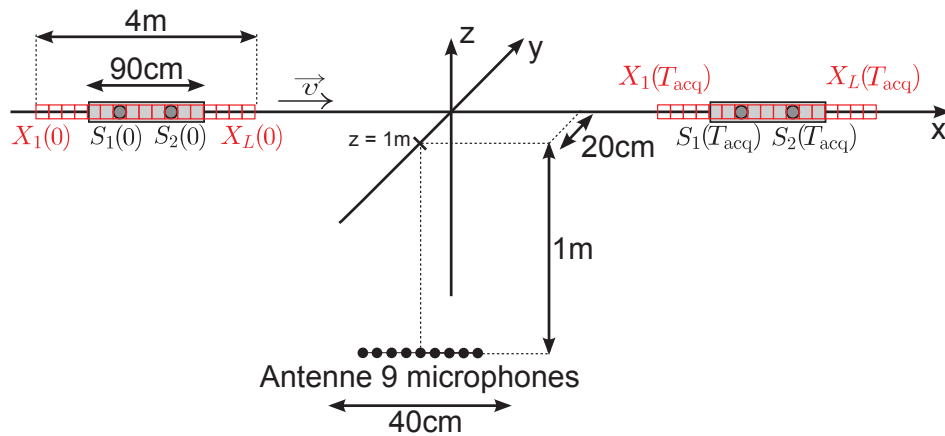


FIGURE 3.13 – Configuration expérimentale de deux sources de bruit blanc pour l'application de la méthode initiale et de la correction de trajectographie.

3.2.4.1 Application de la méthode initiale

La méthode initiale est appliquée à l'expérimentation de bruit de passage en air pour montrer que cette méthode est adaptée à la localisation de sources et à l'estimation de la contribution des sources de bruit de passage. La configuration est celle énoncée dans la table 3.2. Le Beamforming-MS est calculé sur un intervalle temporel correspondant à 52 blocs de durée $T = 100ms$ et une portion de trajectoire du centre du mobile $[-0,75m; 0,75m]$. Sur cette portion de trajectoire, la trajectoire du mobile est rectiligne et quasiment uniforme à une vitesse de $0,5m.s^{-1}$ comme constaté dans le paragraphe 3.2.2.2. La trajectoire estimée par tachymétrie est utilisée dans la méthode de localisation par Beamforming-MS.

Localisation de sources

Le résultat du Beamforming-MS par bloc est représenté dans le plan distance-fréquence $[-2m; +2m] \times [1000Hz; 3000Hz]$ sur la figure 3.14a et le résultat de localisation après déconvolution par SDM est représenté sur la figure 3.14b.

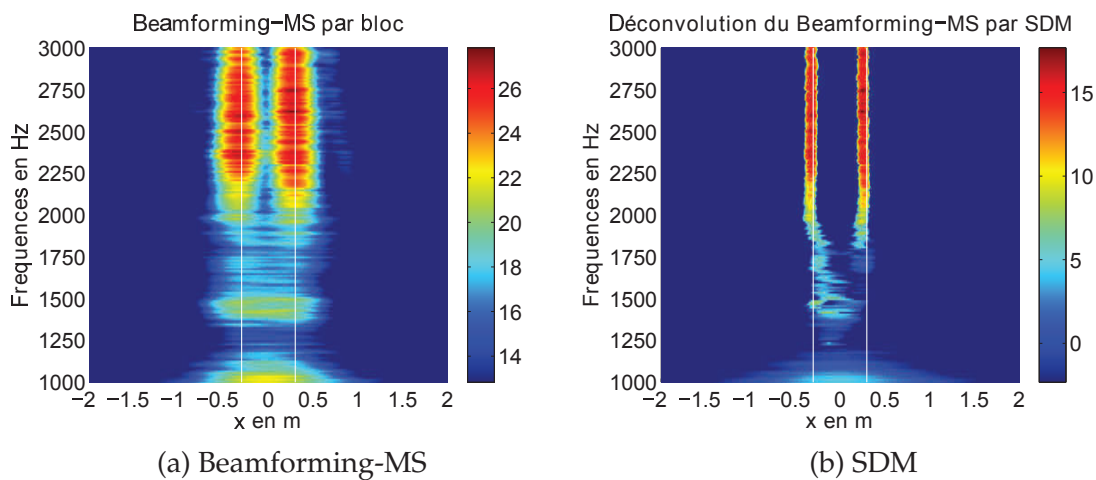


FIGURE 3.14 – Configuration expérimentale de deux sources de bruit blanc de la table 3.2 : Localisation de sources par Beamforming-MS (a) et après déconvolution par SDM (b) sur la portion de trajectoire $[-0,75m; +0,75m]$ du centre du mobile. Les positions réelles des sources sont représentées par des lignes verticales blanches.

Au vu des figures 3.14a et 3.14b, les positions des deux sources sont correctement estimées par les méthodes Beamforming-MS et après déconvolution par SDM pour les fréquences supérieures à 1800 Hz. On note une erreur de localisation des sources d'environ $-0,03m$ pour la source S_1 localisée réellement en $x = -0,3m$ et d'environ $-0,04m$ pour la source S_2 localisée réellement en $x = +0,3m$. On constate que la déconvolution du Beamforming-MS par SDM parvient à localiser deux sources à partir de 1600 Hz bien que les localisations soient erronées.

Contribution de sources

Afin d'estimer la contribution relative des deux sources à la signature acoustique, il est nécessaire de définir des zones de contribution. Les zones de contribution de ce cas d'étude sont les suivantes :

- Zone correspondant à la source S_1 : $[-0,5m; -0,1m]$
- Zone correspondant à la source S_2 : $[+0,1m; +0,5m]$
- Zone correspondant aux sources non désirées : $[-2m; -0,5m] \cup [-0,1m; +0,1m] \cup [+0,5m; 2m]$

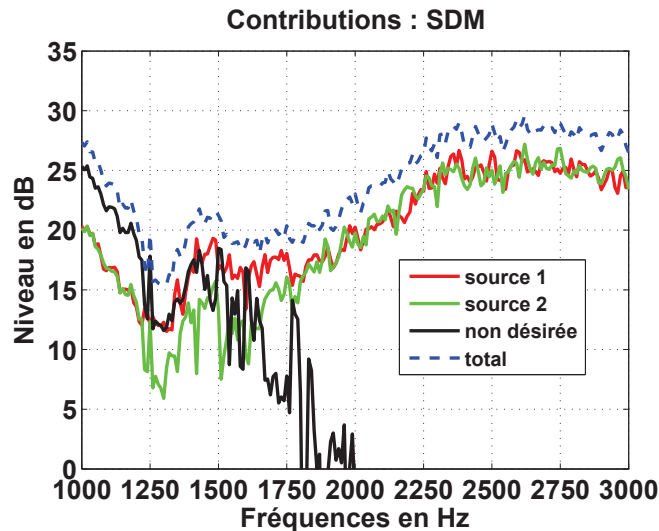


FIGURE 3.15 – Configuration expérimentale de deux sources de bruit blanc de la table 3.2 : Contributions des sources estimées par SDM.

Les spectres de contributions estimés par SDM sont représentés sur la figure 3.15. Le spectre de contribution des sources de même niveau est correctement estimé à partir de 1750 Hz. Cela correspond à la bande fréquentielle pour laquelle les sources sont correctement localisées après déconvolution par la méthode SDM, d'après la figure 3.14b. En revanche, le spectre de contribution des sources non désirées domine les spectres des contributions des sources physiques pour les fréquences inférieures à 1750 Hz. Cela ne permet pas une estimation correcte des contributions des sources physiques. Ceci est en accord avec la "non-localisation" des sources observée sur la figure 3.14b.

Dans les limites de résolution de l'antenne, la méthode initiale permet donc d'estimer correctement la localisation et la contribution des sources à partir de la trajectoire estimée par tachymétrie.

3.2.4.2 Application de l'algorithme de correction de trajectographie

L'algorithme de correction acoustique de la trajectoire est maintenant appliqué à la configuration expérimentale de la table 3.2 pour montrer son efficacité en environnement réel.

Le Beamforming-MS est calculé sur un intervalle temporel correspondant à 41 blocs de durée $T = 100ms$ et une portion de trajectoire du centre du mobile $[-1, 2m; 0m]$ qui est parcourue en 2,09 secondes par le mobile. Cette portion de trajectoire a été choisie car elle correspond à une portion de vitesse non uniforme qui peut intervenir dans une expérience de bruit de passage de véhicule de transport (fig. 3.9b). Cette portion de trajectoire ne sera pas toujours estimée correctement par les méthodes classiques de trajectographie.

Étant donnée la précision de la mesure de trajectoire dans notre expérience contrôlée, la trajectoire estimée par tachymétrie est supposée être la vérité terrain et sera appelée *trajectoire réelle*. Une trajectoire initiale rectiligne uniforme de vitesse $v = 0,58m.s^{-1}$ est définie comme *a priori* réaliste. Cette *trajectoire initiale* est égale à la trajectoire réelle sur la portion correspondant à une vitesse uniforme.

La trajectoire initiale et la trajectoire réelle de la source sont représentées sur la figure 2.41.

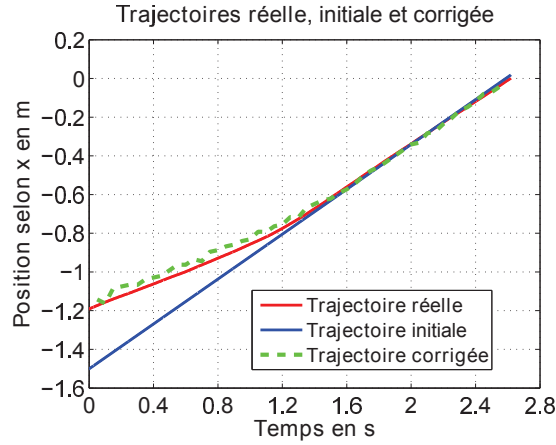


FIGURE 3.16 – Trajectoire initiale (—), trajectoire corrigée (—) et trajectoire réelle (—).

Calcul des décalage spatiaux entre les résultats de Beamforming-MS

Tout d'abord, les résultats de localisation sont calculés par Beamforming-MS indépendamment sur chaque bloc en utilisant la trajectoire initiale. La matrice des décalages \mathbf{M}_D obtenue est représentée sur la figure 3.17a. Les éléments de \mathbf{M}_D sont indicés par les instants centraux des blocs temporels. La matrice binaire \mathbf{M}_B est calculée en utilisant un paramètre de voisinage $\mathfrak{V} = 0,1m$ (éq. (2.66)), elle est représentée sur la figure 3.17b. Selon le critère de sélection de la localisation la plus courante, le bloc de référence est $t_r = 1,93s$.

Correction de la trajectoire initiale

La trajectoire corrigée est ensuite calculée à partir des données du paragraphe précédent et par l'équation (2.67). La figure 3.16 représente la trajectoire corrigée en tirets verts. Pour ce cas de simulation, la méthode de correction de trajectographie parvient à estimer une

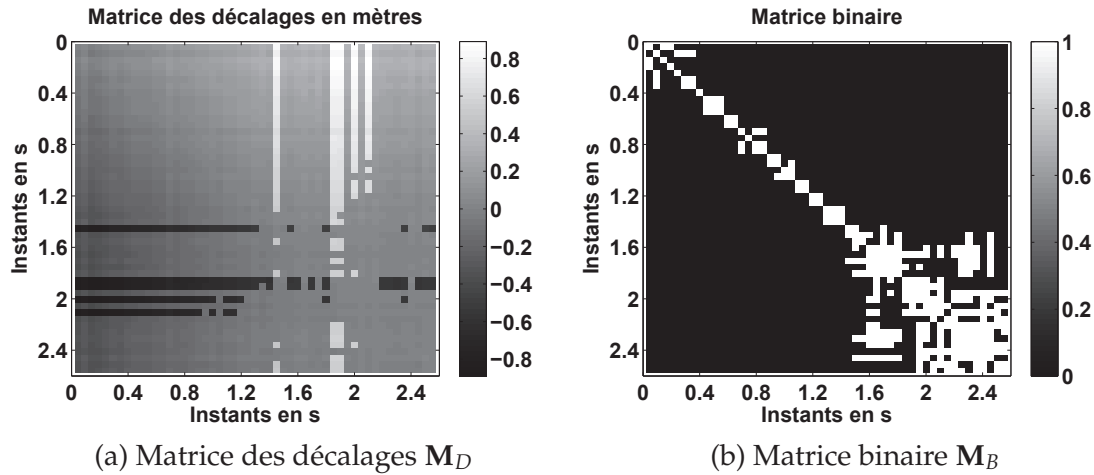


FIGURE 3.17 – Matrice des décalages M_D contenant tous les décalages spatiaux entre localisations (a). Matrice binaire M_B (b).

trajectoire corrigée égale à la trajectoire réelle à 5 centimètres près, pour un pas de calcul égal à 1 centimètre.

Pour évaluer l'efficacité de la procédure de correction de trajectographie sur les résultats de localisation de sources, les résultats de Beamforming-MS sont représentés pour la trajectoire initiale en noir, la trajectoire corrigée en tirets noirs, à la fréquence $f = 3000\text{Hz}$.

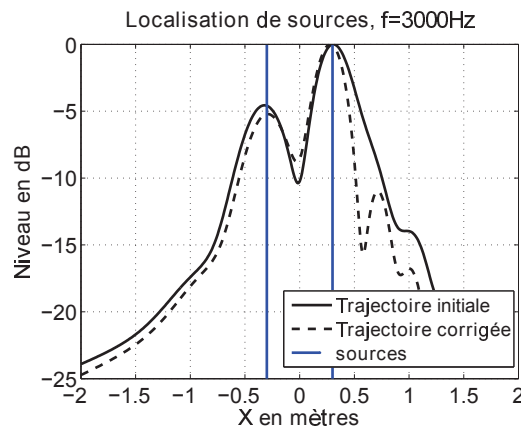


FIGURE 3.18 – Résultats de Beamforming-MS par bloc pour la trajectoire initiale (—) et la trajectoire corrigée (---) à la fréquence $f = 3000\text{Hz}$. Les positions réelles des sources sont indiquées par les traits verticaux bleus.

La table 3.3 liste les différentes valeurs de performances des résultats du Beamforming-MS par bloc de la figure 3.18.

Une première observation peut être faite à partir des valeurs de résolution, permettant d'affirmer que l'erreur de correction de trajectoire d'au maximum 5 centimètres est néglig-

Trajectoire	Résolution	Dynamique	Erreur de localisation
Initiale	$\hat{S}_1 : 0,44m$ $\hat{S}_2 : 0,36m$	$\hat{S}_1 : 9,5dB$ $\hat{S}_2 : 14,17dB$	Erreur sur $\hat{S}_1 : -0,04m$ Erreur sur $\hat{S}_2 : +0,02m$
Corrigée	$\hat{S}_1 : 0,42m$ $\hat{S}_2 : 0,30m$	$\hat{S}_1 : 5,83dB$ $\hat{S}_2 : 11,16dB$	Erreur sur $\hat{S}_1 : -0,02m$ Erreur sur $\hat{S}_2 : +0,02m$

TABLE 3.3 – Performances de localisation à $f = 3000Hz$ du Beamforming-MS de la figure 3.18.

geable pour la localisation par Beamforming-MS.

Concernant les résultats de localisation, la résolution et l'erreur de localisation sont dégradées par les erreurs de trajectographie. D'après les valeurs de la table 3.3, l'algorithme de correction acoustique de la trajectographie a amélioré la résolution et la précision de localisation des deux sources. En revanche, il est à noter que la dynamique est meilleure avec la trajectoire initiale car les premiers lobes secondaires de localisation sont lissés grâce à la moyenne sur les blocs temporels intervenant dans l'expression du Beamforming-MS (eq. (2.22)).

3.2.5 Conclusions

Les résultats de Beamforming-MS et de SDM, obtenus dans cette expérimentation en air, pour une configuration de deux sources de bruit blanc ont montré que la méthode initiale, avec la nouvelle stratégie de pondération, permettait d'estimer la localisation et la contribution des sources dans une expérience de bruit de passage. Cette expérimentation aérienne a également permis de valider la faisabilité de la méthode de correction acoustique de la trajectoire, en environnement réel et dans le cas de deux sources, pour l'amélioration des résultats de localisation de sources. En effet, l'algorithme de correction acoustique de la trajectographie a permis d'améliorer les résultats de localisation de sources par Beamforming-MS en termes de résolution et de précision de localisation en estimant une trajectoire corrigée. Ce résultat est intéressant puisque les erreurs de trajectographie sont courantes dans les mesures de bruit de passage.

3.3 Campagne de mesures sous-marines : Lac de Castillon

La deuxième campagne de mesures de bruit de passage est une campagne de mesures sous-marines qui a eu lieu au Site d'Essais Sonar et Acoustique du lac de Castillon de la DGA Techniques Navales en Janvier et Février 2015. Cette installation est composée d'un système de tractage et d'une maquette à l'échelle 1/5ème de la frégate La Fayette, dénommée AMANDA, représentée sur la photographie de la Marine Nationale de la figure 1.9. L'ensemble des sources était constitué de pots vibrants et de haut-parleurs instrumentés à

l'intérieur de la carène.

Dans cette section, nous présentons d'abord le protocole expérimental mis en œuvre pour cette expérimentation. Ensuite, l'installation est caractérisée par une estimation du rapport signal sur bruit des mesures et le détail de la méthode de trajectographie. Les performances de localisation de sources du Beamforming-MS avec l'antenne de mesures sont calculées et comparées à la simulation. Enfin, nous présentons une application pratique des méthodes proposées dans le chapitre 2 sur une configuration de sources représentatives d'un navire à deux vitesses différentes. Le traitement d'ouverture synthétique est appliqué à une configuration de deux sources sinusoïdales en basses fréquences.

La figure 3.19 est une photographie d'une vue globale de la configuration expérimentale de l'expérimentation du lac de Castillon.

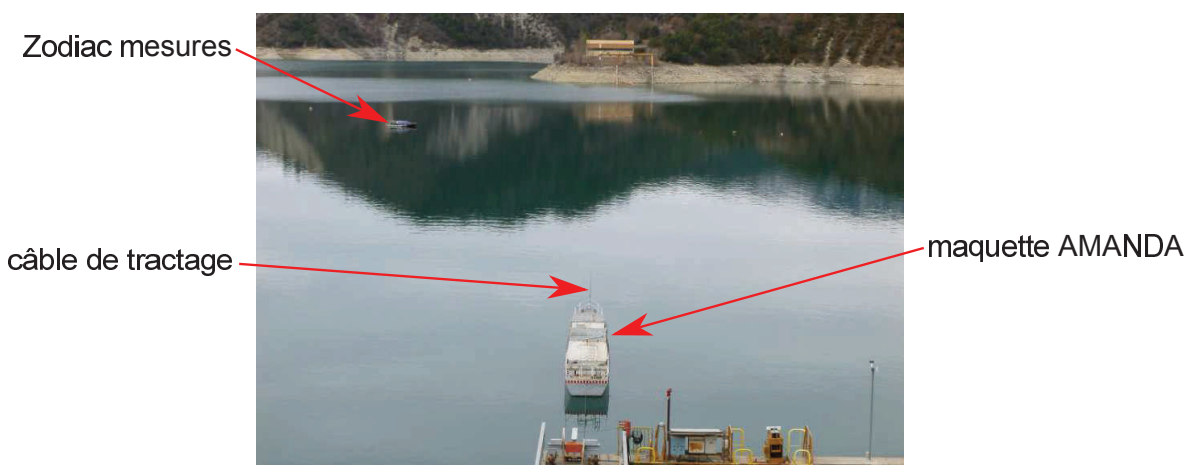


FIGURE 3.19 – Photographie de la configuration expérimentale de l'étude de bruit de passage d'une maquette de navire de surface au lac de Castillon

Dans cette section, les niveaux de pression acoustique affichés sont des *niveaux de pression acoustique relatifs*.

3.3.1 Protocole expérimental

Cette sous-section présente le protocole expérimental utilisé pour réaliser cette expérimentation de bruit de passage en eau. Ce protocole a été construit afin de reproduire expérimentalement le rayonnement acoustique sous-marin d'un navire, à l'échelle d'une maquette. La mise en œuvre de l'expérience est schématisée sur la Figure 3.20. Cette expérience a été réalisée dans le but d'étudier une maquette de navire de surface au passage à des vitesses $v \in [2m.s^{-1}; 5m.s^{-1}]$. Le repère absolu de l'expérience est celui de l'antenne. Les sources sont animées d'un mouvement rectiligne selon l'axe x et évoluent sur la droite située à l'intersection des plans $y = 2,50m$ et $z = -10m$. La distance d'une rive à l'autre est d'environ

630m en surface et 500m au fond, la profondeur du lac était d'environ 70 mètres. L'antenne de mesures a été placée dans la zone la plus profonde du lac et immergée à 10 mètres de profondeur. Le fond du lac constitué essentiellement de vase possède un fort taux d'absorption des ondes acoustiques. Au vu de l'immersion de l'antenne et de la nature du fond du lac, la propagation des ondes acoustiques dans le lac de Castillon vérifient bien le modèle de propagation supposant une influence du fond négligeable et présenté dans la section 1.4.

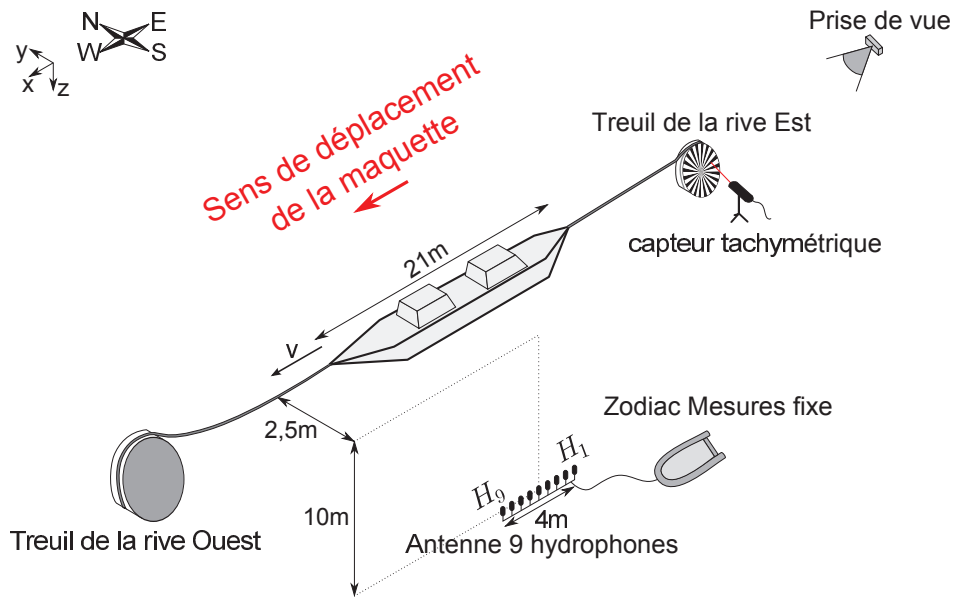


FIGURE 3.20 – Configuration expérimentale pour l'étude de bruit de passage de la maquette AMANDA d'un navire de surface au lac de Castillon

L'installation se décompose en trois éléments qui sont décrits dans cette sous-section : les équipements pour l'émission acoustique, le système de mise en mouvement des sources et les équipements pour l'acquisition acoustique et tachymétrique. La portion de trajectoire considérée pour l'application des méthodes de localisation de sources et d'identification de sources est enfin présentée.

Équipements pour l'émission acoustique

Deux types d'excitations mécaniques de la carène de la maquette AMANDA sont utilisés afin de générer les sources acoustiques d'intérêt et sont représentés sur la figure 3.21 :

- des pots vibrants (fig. 3.21a) sont collés sur la surface interne de la carène orientée vers l'antenne lors d'un tir. Chaque pot génère une source acoustique ponctuelle localisée sur la surface externe de la carène au niveau du point d'impact du pot vibrant.
- des haut-parleurs (fig. 3.21b) sont positionnés dans certains compartiments de la maquette et suspendus de façon à être découplé de la structure de la carène. Chaque haut-parleur génère une source acoustique étendue localisée sur la surface externe de la carène autour de la position du haut-parleur.

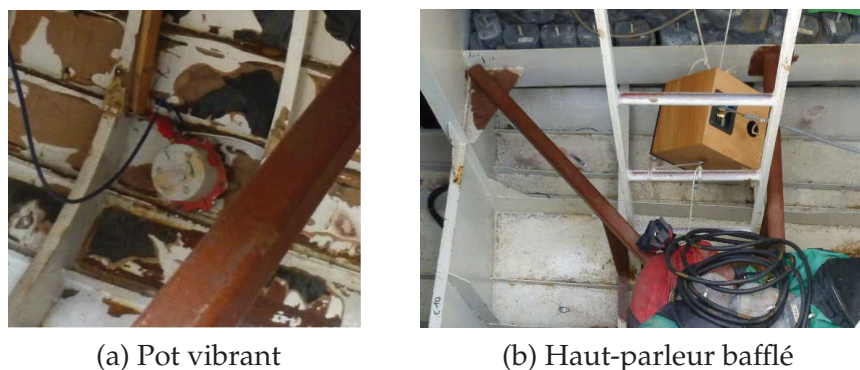


FIGURE 3.21 – Photographies du pot vibrant “Pot Réf.” (a) et du haut-parleur “Acou1” (b).

La Figure 3.22 donne les positions des différentes excitations mécaniques au sein de la maquette AMANDA par rapport au pot de référence “Pot Réf.” qui définit la coordonnée $x = 0m$ dans le référentiel de la maquette AMANDA. La maquette AMANDA possède une ligne d’eau d’environ 21,5 mètres de long, cette longueur sera appelée *longueur de la maquette* par abus de langage. Dans tout le rapport, le point central de la grille de calcul utilisée pour le calcul des résultats de localisation est choisi à l’abscisse de ce pot de référence.

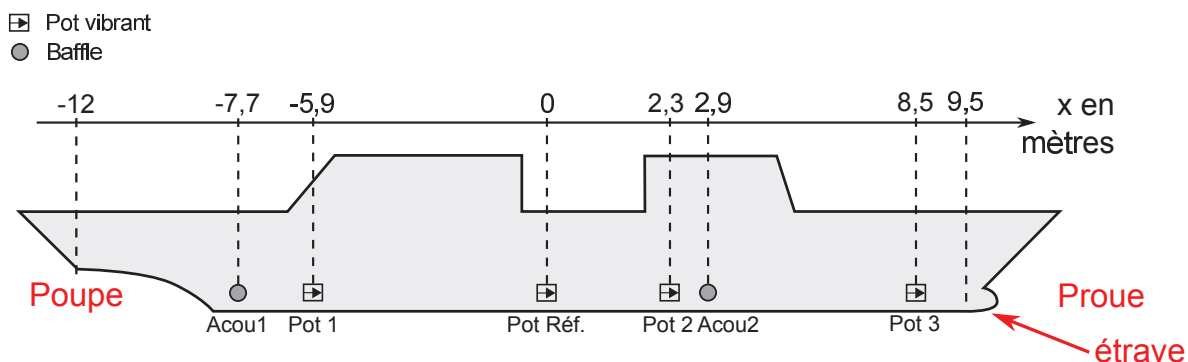


FIGURE 3.22 – Schéma de la géométrie de la coque de la maquette AMANDA, les positions des différentes sources sont repérées par rapport au Pot Réf. qui correspond à l’origine des abscisses de la grille de calcul qui est utilisée dans les résultats de localisation de sources.

Toutes les sources d’intérêt de cette section sont donc des sources vibroacoustiques associées à la carène vibrante de la maquette AMANDA.

Système de mise en mouvement des sources

Dans ce type d’expérience de bruit de passage de navire de surface, le système de mise en mouvement des sources est plus délicat à mettre en œuvre que celui des expériences aériennes qui était composé d’un rail de guidage. En effet, une vitesse de vent de quelques mètres par seconde suffit à faire dériver la maquette AMANDA de plusieurs mètres. Le

système de tractage existant au lac de Castillon est composé d'un câble de kevlar fixé à la maquette AMANDA à la proue et à la poupe et mis en tension par deux treuils situés sur les rives Est et Ouest du lac (fig. 3.20). Un système d'asservissement mécanique permet d'assurer une tension non nulle à la proue et à la poupe pendant toute la durée du tractage, ce qui permet de limiter la dérive de la maquette au cours de son passage. Pour des conditions avec des grandes vitesses de vent $\approx 5m.s^{-1}$, la maquette est tractée à plus grande vitesse $v \geq 4m.s^{-1}$ afin de limiter la dérive lors du tir.

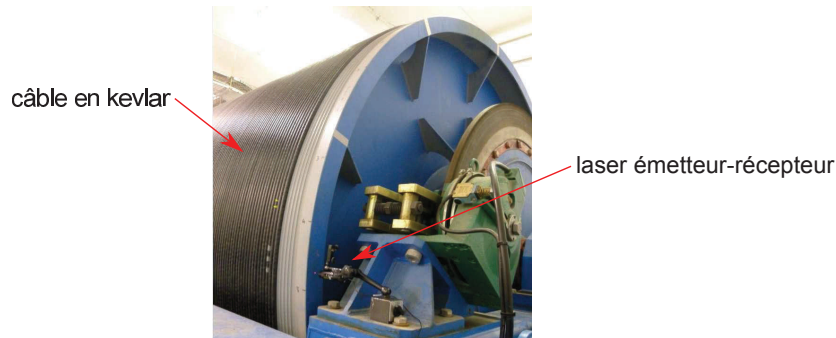


FIGURE 3.23 – Photographie du treuil situé sur la rive Est du lac de Castillon.

Équipements pour l'acquisition acoustique et tachymétrique

Contrairement aux expérimentations en air présentées dans la section 3.2, les mesures acoustiques et les mesures tachymétriques ont été ici acquises avec deux frontaux d'acquisition différents. Chaque frontal d'acquisition a enregistré un signal de datation, selon la norme IRIG-B [IRIG 1987], fourni par une horloge. Les deux horloges synchronisées par GPS permettent ainsi la synchronisation des mesures des deux frontaux par un calcul de différence entre les dates associées aux mesures acoustiques et les dates associées aux mesures tachymétriques. Toutes les mesures sont acquises avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 25600Hz$.

Mesures acoustiques

L'antenne linéaire régulière est constituée de 9 hydrophones B&K 8106 espacés de 50cm, elle a ainsi une bande passante de [375Hz, 1500Hz] pour une envergure de 4m, elle est représentée sur la figure 3.24.

Ces 9 hydrophones sont conditionnés par des amplificateurs NEXUS 2690 et enregistrés par le frontal d'acquisition NI PXI. Ces équipements sont alimentés par batterie et situés sur le zodiac "mesures" situé au milieu du lac (Fig. 3.20).

Mesures tachymétriques

La poulie du treuil de la rive Est est divisée en 10 secteurs angulaires par 10 bandes réfléchissantes (fig. 3.23), elle possède un rayon de 1,25 mètres, *i.e.* un périmètre de 7,85 mètres. Le même pointeur laser émetteur-récepteur que les expérimentations en air est utilisé ici. Il délivre un signal de tension crénelée d'amplitude $-0,7$ volts. Cette tension est transformée

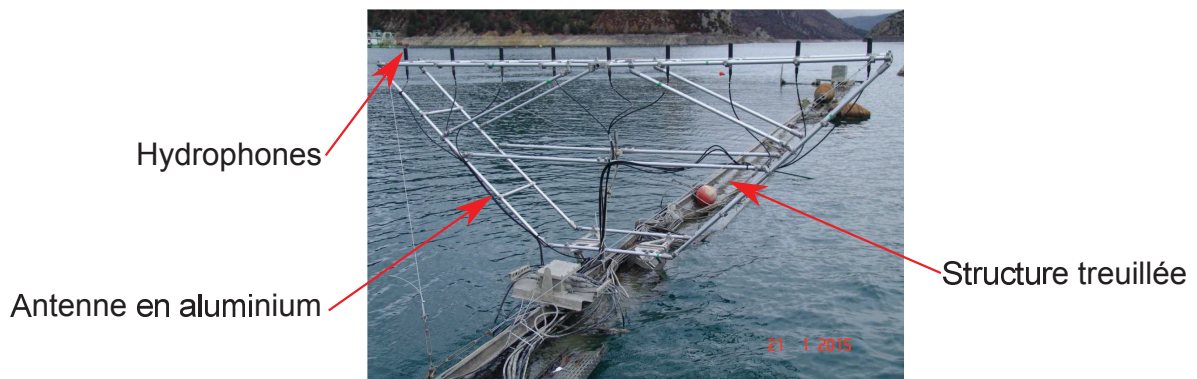


FIGURE 3.24 – Photographie de l’antenne sur le polygone acoustique.

en longueur de déroulement du câble de tractage en mètres par seconde. Ce signal tachymétrique est acquis par le frontal d’acquisition HEIM qui est localisé sur la rive Est du lac de Castillon. La poulie du treuil de la rive Est est responsable de la plus faible traction lors d’un tir de maquette, elle a donc été choisie pour les mesures tachymétriques car elle est moins sujette aux effets d’élasticité du câble, *i.e.* le périmètre de la poulie du treuil de la rive Est correspond effectivement à un déplacement de la maquette de 7,85 mètres lors d’un tour de la poulie.

3.3.2 Caractérisation de l’installation

Cette section présente une caractérisation de l’installation de tractage. L’algorithme de trajectographie développé pour cette expérience de passage de maquette tractée est détaillé et validé. Enfin, la localisation d’une source de bruit blanc est détaillée afin d’évaluer les performances de l’antenne d’hydrophones sur la bande de fréquences d’intérêt [500Hz; 2000Hz].

3.3.2.1 Trajectographie

La dérive de la maquette AMANDA est définie comme étant un déplacement de la maquette selon l’axe y par rapport à la ligne de tractage de coordonnée $y = 2,50m$ et $z = -10m$ (fig. 3.20). La valeur maximale de la dérive de la maquette est supposée atteinte au CPA (*Closest Point of Approach*), *i.e.* point de passage au plus proche de l’antenne. Elle est estimée à partir d’une prise de vue selon l’axe x depuis la rive Est comme représenté sur le schéma de la figure 3.20. La valeur maximale de la dérive sur les configurations expérimentales qui sont étudiées dans cette section n’excède pas une amplitude de 1,5 mètres.

Un calcul simple permet de montrer que l’hypothèse d’une trajectoire linéaire de la maquette avec une dérive constante est valide pour l’analyse de ces mesures. En effet, une dérive maximale égale à 1,50 mètres sur toute la durée du passage de la rive Est à la rive

Ouest, *i.e.* sur une distance d'environ 600 mètres autour du CPA, correspond à une dérive maximale égale à 0,075 mètres sur une distance de 30 mètres autour du CPA. Le schéma de la figure 3.25 illustre ce calcul. Les vitesses de tractage de la maquette étant supérieures à

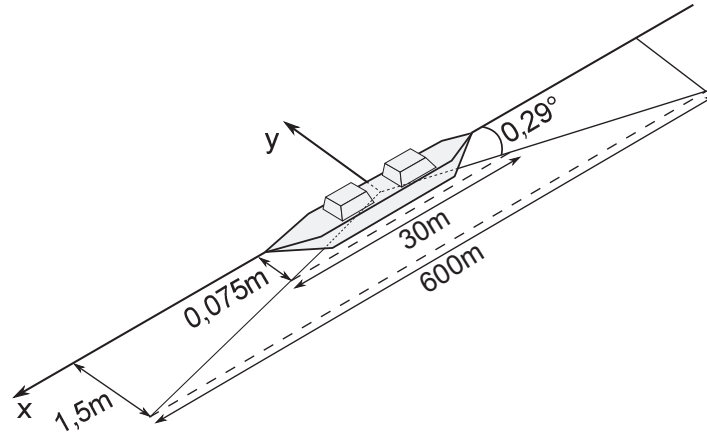


FIGURE 3.25 – Schéma pour le calcul justifiant l’hypothèse d’une trajectoire linéaire, parallèle à l’axe x, pour l’analyse des mesures au lac de Castillon.

$v = 2m.s^{-1}$ et la durée des blocs temporels étant $T = 100ms$, le déplacement de la maquette au cours d’un bloc temporel est donc supérieur à 20 centimètres. Avec l’hypothèse de déplacement des sources négligeable pendant T supposée par la méthode de Beamforming-MS, la variation de la dérive est donc négligeable sur une distance de tractage de 30 mètres autour du CPA. Nous considérons donc pour l’analyse des configurations expérimentales de cette section une trajectoire linéaire de la maquette AMANDA, parallèle à l’axe x, avec une dérive constante égale à la dérive maximale estimée par prise de vue.

La tachymétrie permet donc d’estimer la position instantanée de la maquette AMANDA selon l’axe x. Lorsque le pointeur laser émetteur-récepteur balaie une bande réfléchissante, il émet un créneau de tension continue au frontal d’acquisition constitué d’un front montant et d’un front descendant. La durée entre deux fronts montants successifs correspond donc à une longueur Δl de câble déroulé égale à un dixième du périmètre de la poulie du treuil Est, à savoir $\Delta l = \frac{2\pi \cdot 1,25}{10} = 0,785m$. Deux informations de trajectographie s’en déduisent donc :

- Position : la maquette AMANDA a parcouru Δl pendant la durée Δt correspondant à la durée entre deux fronts montants détectés, *i.e.* entre deux bandes réfléchissantes
- Vitesse : la maquette AMANDA s’est déplacée à une vitesse supposée constante $v(t) = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ pendant Δt

3.3.2.2 Caractérisation des performances de l’antenne

Les performances de localisation de l’antenne acoustique sont maintenant caractérisées sur la bande de fréquences $[500Hz; 2000Hz]$. Cette étape préliminaire est importante pour valider que les performances réelles du système d’imagerie acoustique sont proches de celles

attendues en simulations. Pour cette étude, la configuration utilisée est une configuration avec le pot vibrant "Pot 2" piloté par un signal dont l'allure du spectre est une bosse de bruit maximale à la fréquence 900 Hz et une consigne de vitesse de tractage de $2m.s^{-1}$. Comme évoqué précédemment, un pot vibrant génère une source acoustique ponctuelle à la surface externe de la carène. La simulation d'une source ponctuelle en mouvement est donc utilisée pour cette étude de performance d'antenne.

Le tableau 3.4 présente les paramètres utilisés pour l'analyse de cette configuration.

Configuration expérimentale

- Célérité des ondes acoustiques : $c = 1500m.s^{-1}$
- Durée d'acquisition $T_{acq} = 4s$
- Fréquence d'échantillonnage : 25600Hz
- Résolution fréquentielle : $\Delta f = 10Hz$ (bloc temporel de durée $T = 100ms$)
- Consigne de vitesse de tractage : $2m.s^{-1}$
- Pot "Pot 2" (fig. 3.22) piloté par un spectre de bosse de bruit maximale à 900 Hz
- Grille de calcul $\mathbf{x}(t) = [X_1(t), \dots, X_L(t)]^T$ de longueur 30m centrée sur la maquette AMANDA à chaque instant
- Dérive au CPA : $d_{CPA} = -0,79m$ (vers le Sud)
- Trajectoire du centre de la maquette AMANDA selon x : $x(t) = -4m + v.t$
- Antenne linéaire régulière de 9 microphones espacés de 50cm en x
- Nombre de blocs utilisés pour le calcul : 79 blocs avec un recouvrement de 50%

TABLE 3.4 – Configuration expérimentale pour la comparaison des performances expérimentales et théoriques de l'antenne du lac de Castillon.

Rapport Signal Sur Bruit (RSB)

Le bruit de fond de ces expérimentations en eau est défini comme étant la combinaison du bruit ambiant du lac de Castillon et du bruit associé au passage de la maquette AMANDA sans excitation mécanique. En effet, dans cette section, nous considérons que les sources d'intérêt sont les pots vibrants et les haut-parleurs. Afin d'évaluer le RSB de la mesure, l'autospectre du signal mesuré au niveau de l'hydrophone H_5 de l'antenne, *i.e.* l'hydrophone central d'après la numérotation de la figure 3.20, est superposé à l'autospectre du bruit de fond (estimé sur 10 secondes) mesuré par ce même hydrophone sur la Figure 3.26.

Le RSB de la mesure est donc bon puisque l'autospectre du signal avec le bruit (fig. 3.26, en vert) est supérieur de 10dB par rapport à l'autospectre du bruit de mesure (fig. 3.26, en rouge) sur la plage fréquentielle d'intérêt [500Hz;2000Hz].

La résolution en mètres et la dynamique en decibels du Beamforming-MS sont tracées sur la Figure 3.27. Sur la figure 3.27a sont tracées la résolution du Beamforming-MS pour la configuration expérimentale décrite par la table 3.4 en tirets et pour la simulation d'une source ponctuelle avec les mêmes géométries de mesure en trait continu. La résolution ob-

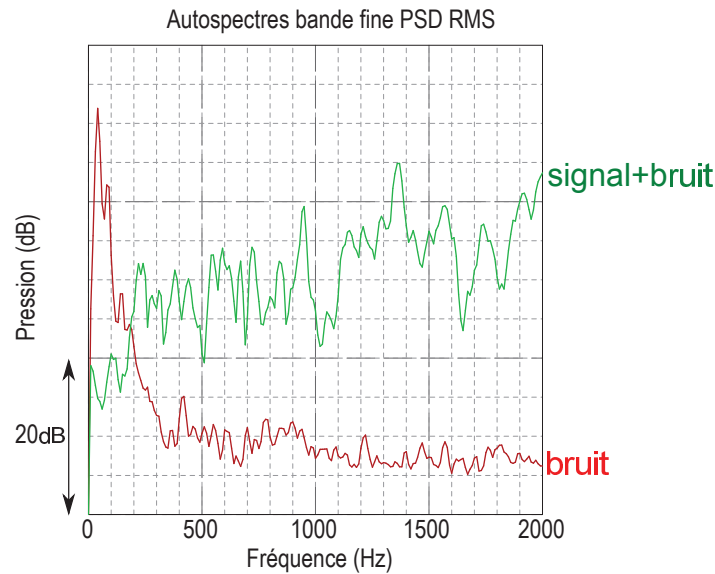


FIGURE 3.26 – Consigne de vitesse de tractage $2m.s^{-1}$: Autospectres en bande fine de l’hydrophone H_5 . Pour la configuration d’étude en vert et pour le bruit de fond en rouge. La dynamique d’affichage est de 20dB par division.

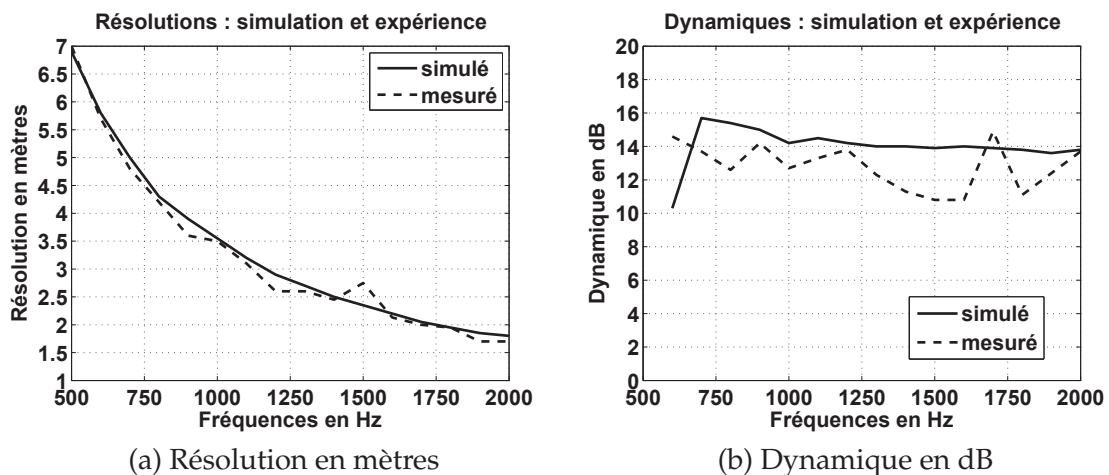


FIGURE 3.27 – Performances de l’antenne du lac de Castillon : Résolution en mètres du Beamforming-MS (a) et dynamique en decibels du Beamforming-MS (b).

tenue expérimentalement est égale à la résolution obtenu par simulation avec une erreur n’excédant pas 30cm sauf pour la fréquence 1500Hz, cette fréquence correspond à une atténuation du signal du pot vibrant au cours de son transfert à travers la carène (Fig. 3.26). Sur la figure 3.27b sont tracées la dynamique du Beamforming-MS pour la configuration expérimentale en tirets et la configuration simulée en trait continu. La dynamique expérimentale est en moyenne 2dB plus faible que la dynamique simulée, cela s’explique par une diffé-

rence entre l'expérience et la simulation, à savoir des hypothèses mises en défaut (bruit de tractage, erreurs de modèle). La dynamique expérimentale est tout de même conforme aux prévisions et restent dans les mêmes ordres de grandeur que la dynamique en simulations, à savoir environ 12 dB.

3.3.3 Résultats expérimentaux

Dans cette sous-section, nous présentons d'abord la stratégie utilisée pour l'analyse des expérimentations qui ont eu lieu à Castillon. Puis, une analyse d'une configuration expérimentale de deux sources est réalisée. Ces deux sources acoustiques ont été générées par deux pots vibrants pilotés par des signaux identiques aux sources acoustiques de la configuration réaliste présentée dans le paragraphe 1.5. Enfin, le traitement d'ouverture synthétique proposé est appliqué à une configuration expérimentale de deux sources sinusoïdales en basse fréquence.

3.3.3.1 Stratégie d'analyse des mesures acoustiques de Castillon

Le protocole expérimental de ces expérimentations a été mis en place pour se doter de géométries de mesure réelles. Dans notre cas, l'antenne réduite utilisée possède une envergure de 4 mètres et la maquette de navire de surface AMANDA possède une longueur d'environ 21,5 mètres (fig. 3.22). D'après l'étude bibliographique du chapitre 1, les sources acoustiques d'un navire de surface peuvent être localisées en tout point de la carène du navire et également dans le sillage de l'étrave et de la poupe. De plus, la longueur du navire à imager est souvent plus grande que l'antenne qui est réduite, il convient donc d'utiliser un temps d'acquisition suffisamment long pour que le navire de surface soit entièrement passé au-dessus de l'antenne hydrophonique. La figure 3.28 représente la portion de trajectoire considérée pour l'étude acoustique de la maquette AMANDA.

Le temps d'acquisition est donc choisi tel que l'angle de vue de la proue de la maquette AMANDA par rapport au droit de l'antenne soit de $+15^\circ$ au début de la trajectoire et telle que l'angle de vue de la poupe de la maquette AMANDA par rapport au droit de l'antenne soit de -15° à la fin de la trajectoire. Pour les géométries de mesure considérées cela correspond à une trajectoire longue de 26,9 mètres comme le montre la figure 3.28. Pour cette durée d'acquisition, le centre de la maquette AMANDA localisé au niveau du pot "Pot Réf." (fig. 3.22) évolue de l'abscisse $x = -12,2m$ à l'abscisse $x = 14,7m$. La grille de calcul est définie avec une longueur de 30 mètres de telle sorte à englober toute la longueur du navire de surface.

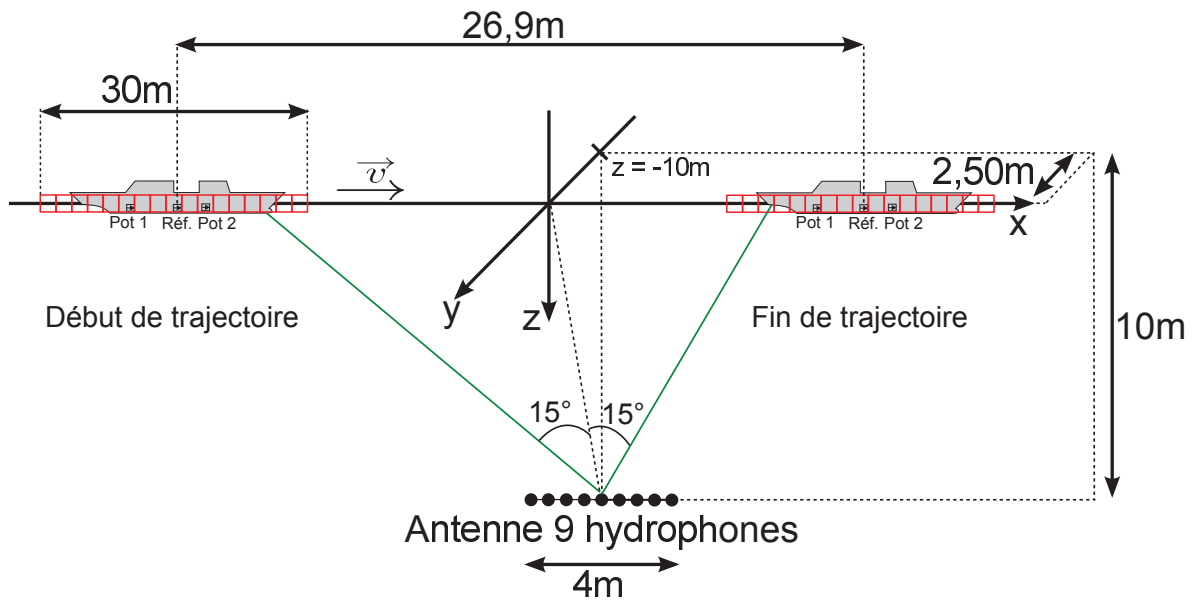


FIGURE 3.28 – Schéma des géométries de mesure et de la portion de trajectoire considérées pour l'analyse des mesures acoustiques acquises au site d'essais du lac de Castillon

3.3.3.2 Application de la méthode initiale

Une configuration expérimentale de deux sources est réalisée afin de reproduire expérimentalement la configuration réaliste présentée dans le paragraphe 1.5, elle correspond à des passages de maquette avec :

- le pot “Pot 2” piloté par un signal dont l'allure du spectre est une bosse de bruit maximale à la fréquence 900 Hz. Cette excitation mécanique représente la source associée au propulseur.
- le pot “Pot 1” piloté par une somme de trois sinus de fréquences 1200 Hz, 1400 Hz et 1800 Hz. Cette excitation mécanique représente les sources internes de carène.

Le câblage électrique des pots vibrants au cours des expérimentations au lac de Castillon est tel que l'ordre des sources est inversé par rapport à la configuration de sources de la simulation réaliste présentée dans le paragraphe 1.5.

Cette configuration est réalisée avec deux consignes de vitesses différentes, $2m.s^{-1}$ et $5m.s^{-1}$, afin de voir l'effet du bruit de fond sur les performances des méthodes de localisation de sources et de contribution de sources. Cette configuration permet d'analyser des données expérimentales représentatives de la signature acoustique d'un navire.

La table 3.5 présente les paramètres utilisés pour l'analyse de cette configuration.

Rapport Signal Sur Bruit (RSB)

Afin d'évaluer le RSB de la mesure, l'autospectre du signal mesuré au niveau de l'hydro-

Configuration expérimentale pour la configuration à la vitesse consigne $2m.s^{-1}$ (resp. $5m.s^{-1}$).

- Célérité des ondes acoustiques : $c = 1500m.s^{-1}$
- Durée d’acquisition $T_{acq} = 14, 15s$ (resp. $5, 3s$)
- Fréquence d’échantillonnage : $25600Hz$
- Résolution fréquentielle : $\Delta f = 10Hz$ (bloc temporel de durée $T = 100ms$)
- Consigne de vitesse de tractage : $2m.s^{-1}$ (resp. $5m.s^{-1}$)
- Pot “Pot 1” (fig. 3.22) piloté par une somme de trois sinus $1200Hz$, $1400Hz$ et $1800Hz$
- Pot “Pot 2” (fig. 3.22) piloté par un spectre de bosse de bruit maximale à $900Hz$
- Grille de calcul $\mathbf{x}(t) = [X_1(t), \dots, X_L(t)]^T$ de longueur $30m$ centrée sur la maquette AMANDA à chaque instant
- Dérive au CPA : $d_{CPA} = -1,44m$ (vers le Sud) (resp. $d_{CPA} = 0,84m$ (vers le Nord))
- Trajectoire du centre de la maquette AMANDA selon x : $x(t) \in [-12, 2m; 14, 7m]$
- Antenne linéaire régulière de 9 microphones espacés de $50cm$ en x
- Nombre de blocs utilisés pour le calcul : 281 (resp. 55) blocs avec un recouvrement de 50%

TABLE 3.5 – Configuration expérimentale de la simulation réaliste de deux sources acoustiques typiques d’un navire de surface.

phone H_5 de l’antenne (fig. 3.20) dans la configuration de la table 3.5 est représenté en vert sur la figure 3.29a pour une consigne de vitesse de $2m.s^{-1}$ et sur la figure 3.29b pour une consigne de vitesse de $5m.s^{-1}$. Ce signal contient donc l’information sur les sources d’intérêt mais également une mesure du bruit de fond car il n’était pas possible de faire une mesure des sources sans tractage. Sur ces figures, l’autospectre du bruit de fond mesuré par ce même hydrophone est représenté en rouge pour la même portion de trajectoire. Nous rappelons que le bruit de fond est ici la combinaison du bruit du lac de Castillon et du bruit associé au tractage de la maquette AMANDA.

Au vu de la figure 3.29a, la valeur du RSB de la mesure du passage à la vitesse $2m.s^{-1}$ est supérieur à $10dB$ sur la bande $[500Hz; 2000Hz]$ ce qui est suffisant pour les traitements d’antenne. D’après la figure 3.29b, le RSB de la mesure du passage à la vitesse $5m.s^{-1}$ est relativement faible et vaut de $0dB$ à quelques dB pour les fréquences supérieures à $1000Hz$. Pour des fréquences inférieures à $1000Hz$ et pour une vitesse de tractage de $5m.s^{-1}$, il n’est pas possible d’estimer le RSB de la mesure car, à la fréquence $700Hz$ par exemple, le niveau de l’autospectre du signal d’intérêt et du bruit de mesure possède le même niveau que l’autospectre du bruit de mesure. Les résultats de localisation et de contribution seront donc bruités sur $[500Hz; 2000Hz]$ par le bruit du passage de la maquette AMANDA et le bruit ambiant du lac de Castillon.

Résultats de localisation de sources

La localisation des sources estimée par Beamforming-MS est représentée dans le plan distance-fréquence $[-15m; +15m] \times [500Hz; 2000Hz]$ sur la figure 3.30a et le résultat de loca-

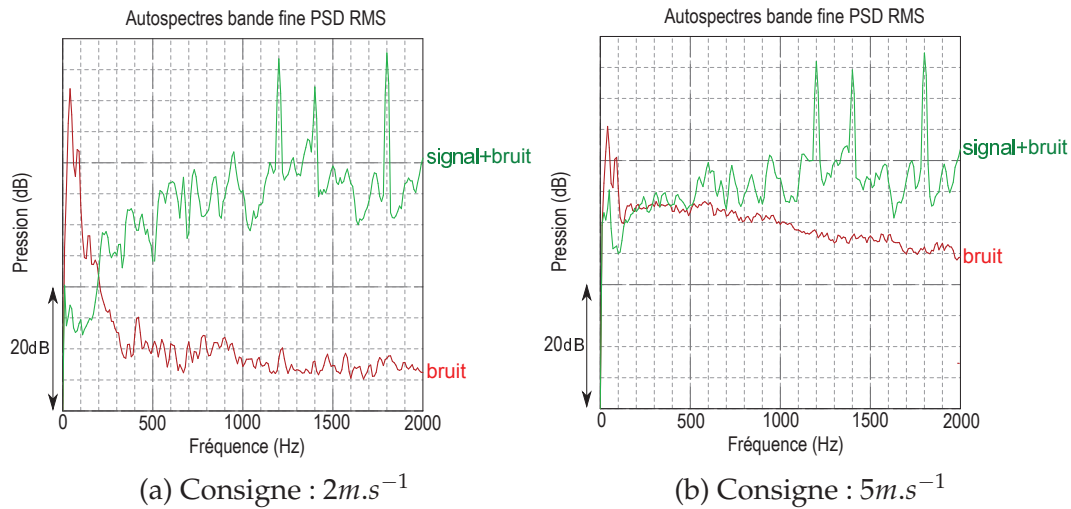


FIGURE 3.29 – Consigne de vitesse de tractage $2m.s^{-1}$ (a) et $5m.s^{-1}$ (b) : Autospectres en bandes fines du signal mesuré par l'hydrophone H_5 en vert pour la configuration de la table 3.5 et en rouge pour le bruit de fond. La dynamique d'affichage est de 20dB par division.

lisation obtenu après déconvolution par SDM est représentée sur la figure 3.30b. Un schéma de la maquette AMANDA avec la position des pots vibrants (fig. 3.22) est représentée à l'échelle des abscisses en-dessous des résultats de localisation. Les mêmes résultats de localisation obtenus pour une vitesse consigne de $5m.s^{-1}$ sont représentés sur la figure 3.31.

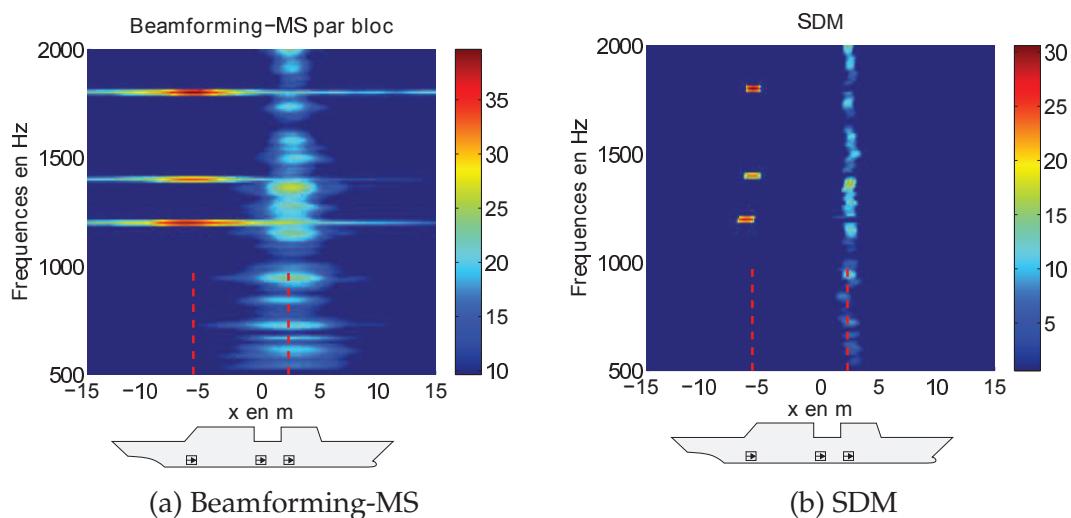


FIGURE 3.30 – Passage de maquette à la vitesse consigne $2m.s^{-1}$ avec la configuration réaliste : Localisation de sources par Beamforming-MS (a) et SDM (b). Les positions réelles des pots vibrants à l'intérieur de la maquette sont repérées par des lignes verticales rouges.

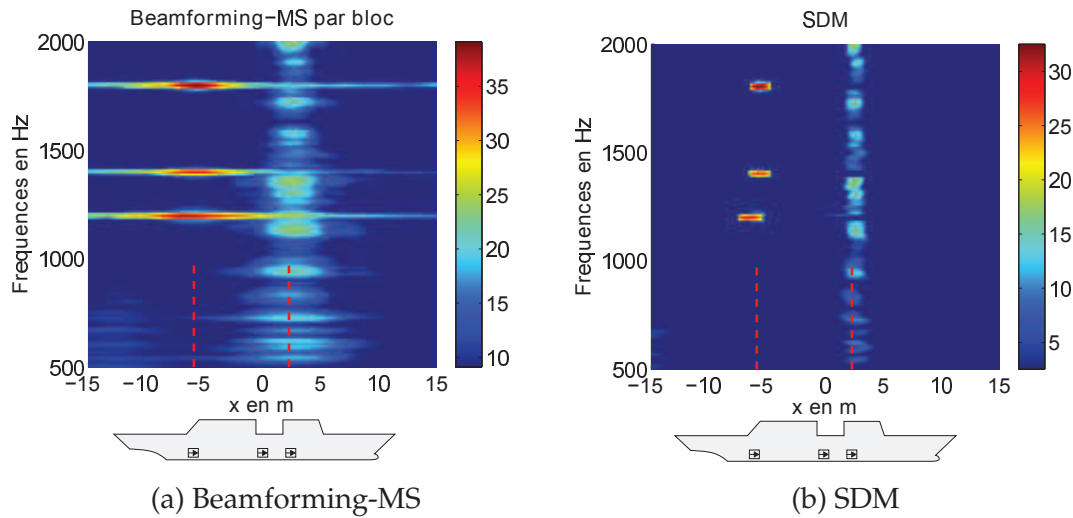


FIGURE 3.31 – Passage de maquette à la vitesse consigne $5m.s^{-1}$ avec la configuration réaliste : Localisation de sources par Beamforming-MS (a) et SDM (b). Les positions réelles des pots vibrants à l’intérieur de la maquette sont repérées par des lignes verticales rouges.

D’après les figures 3.30 et 3.31, les deux pots vibrants “Pot 1” (somme de sinus) et “Pot 2” (bosse de bruit) sont bien localisés au niveau de leur positions physiques au sein de la carène de la maquette AMANDA, par les deux méthodes de localisation de sources et aux deux vitesses consigne. Dans les résultats de localisation après déconvolution par SDM sur les figures 3.30b et 3.31b qui bénéficient d’un meilleur contraste que les résultats de Beamforming-MS, on constate que la source acoustique associée au “Pot 1” (somme de sinus) n’est pas toujours localisée au même endroit selon la fréquence alors que le pot vibrant n’a physiquement pas bougé au sein du navire. Cette observation est particulièrement évidente à la fréquence 1200 Hz, le pot “Pot 1” présente un écart de localisation par rapport à la position du pot vibrant de plusieurs dizaines de centimètres. Cet écart se justifie par le transfert vibroacoustique de l’excitation du pot vibrant au travers de la carène de la maquette AMANDA. En effet, comme il l’a été montré dans la sous-section 2.3.5, la localisation d’une source acoustique générée par l’excitation d’une plaque vibrante par une force ponctuelle varie en fonction de la fréquence.

Enfin, la vitesse consigne $5m.s^{-1}$ induit un faible effet Doppler qui est non négligeable et induit un léger étalement de la localisation de la source associée au pot “Pot 1” à la fréquence 1800 Hz, qui ne perturbe pas l’interprétation des résultats. De plus, à cette vitesse le bruit associé au mouvement de la maquette dans l’eau est élevé (fig. 3.29b) et bruite les résultat de Beamforming-MS dans la zone $[-15m ; -5m]$ pour une dynamique d’affichage de 30 dB. En revanche, la méthode SDM localise uniquement les sources d’intérêt, *i.e.* les pots vibrants, pour une dynamique d’affichage de 35 dB. La méthode SDM est donc plus robuste au bruit de fond.

Contributions en pression de chaque source

Afin d'estimer la contribution relative des deux sources à la signature acoustique, il est nécessaire de définir des zones de contribution. Deux zones sources ont été identifiées au vu des résultats de localisation précédents :

- Zone correspondant au “Pot 1” : $[-8m; -4m]$
- Zone correspondant au “Pot 2” : $[0m; 4m]$
- Zone correspondant aux sources non désirées : $[-15m; -8m] \cup [-4m; +0m] \cup [+4m; 15m]$

La figure 3.32a représente les spectres de contribution du pot “Pot 1” en rouge, du pot “Pot 2” en vert, des sources non désirées en noir et du spectre de contribution de tout le résultat de localisation, estimés par la méthode SDM pour une vitesse consigne de $2m.s^{-1}$. La figure 3.32b représente les mêmes quantités pour le passage de la maquette à la vitesse consigne de $5m.s^{-1}$.

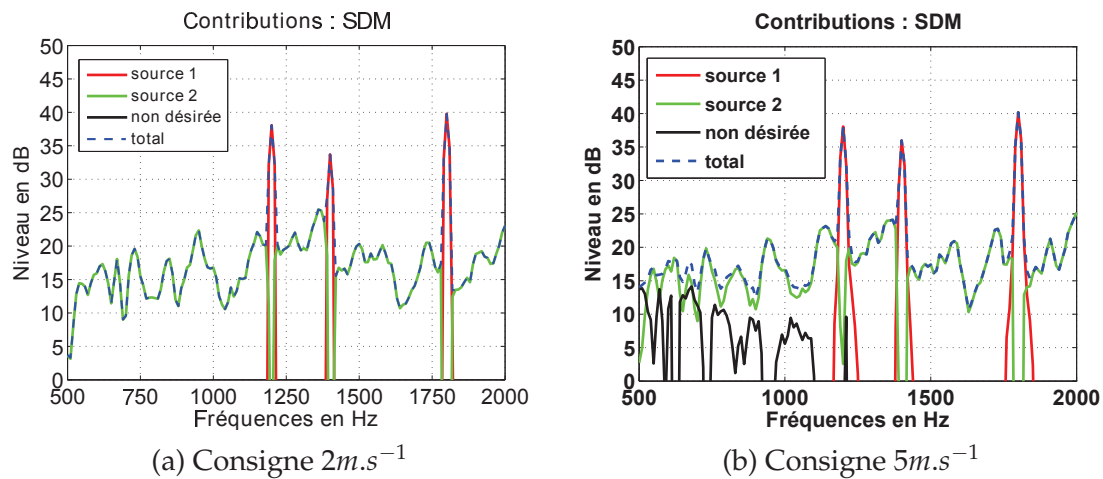


FIGURE 3.32 – Estimation de la contribution des sources par SDM et à partir des zones définies dans ce paragraphe : Passage à la vitesse consigne $2m.s^{-1}$ (a) et passage à la vitesse consigne $5m.s^{-1}$ (b).

Au vu des figures 3.32a et 3.32b, les contributions relatives des sources acoustiques associées aux pots vibrants sont très bien estimées par la méthode SDM sur toute la bande fréquentielle d'étude.

D'après la figure 3.29, les raies fréquentielles du “Pot 1” émergent d'environ 15 dB de la source large bande du pot “Pot 2”. Cela a pour conséquence que la contribution de la source acoustique associée au pot “Pot 2” est affectée par la contribution de la source acoustique associée au pot “Pot 1” : la source associée au pot “Pot 2” n'est pas localisée aux fréquences de la source associée au pot “Pot 1”. Cette observation est valable pour les deux vitesses consigne.

Enfin, la contribution des sources non désirée est nulle pour la configuration de passage à la vitesse $2m.s^{-1}$, les spectres de contribution des sources sont donc égaux au spectre total

aux fréquences des sources. En revanche, pour le passage à la vitesse $5m.s^{-1}$, la contribution des sources non désirée possède un niveau équivalent à la contribution de la source du "Pot 2" sur $[500Hz; 900Hz]$ à cause du bruit de passage de la maquette AMANDA. Cette contribution de sources non désirée n'était pas visible dans les résultats de localisation de sources par SDM de la figure 3.31b.

La méthode initiale avec la nouvelle stratégie de pondération du Beamforming-MS appliquée sur cette configuration montre donc la faisabilité du procédé d'imagerie acoustique proposé. Nous avons ainsi estimé la localisation et la contribution de sources d'un navire au passage sur une expérimentation réelle en eau.

3.3.3.3 Application de l'algorithme d'antenne à ouverture synthétique

Ce paragraphe détaille l'application du traitement d'ouverture synthétique proposé sur une expérimentation en eau. La configuration expérimentale mise en place est constituée de deux pots vibrants "Pot 1" et "Pot 2" pilotés par des sinus de fréquence 700Hz, ces sources sont déphasées d'une phase constante car elles sont générées par deux générateurs de signaux différents. Pour ce cas d'application, nous proposons d'agrandir synthétiquement l'ouverture de l'antenne afin d'améliorer la localisation des deux sources basses fréquences [Oudompheng 2015].

La table 3.6 présente les paramètres utilisés pour l'analyse de cette configuration.

Configuration expérimentale

- Célérité des ondes acoustiques : $c = 1500m.s^{-1}$
- Durée d'acquisition $T_{acq} = 8s$
- Fréquence d'échantillonnage : 25600Hz
- Résolution fréquentielle : $\Delta f = 10Hz$ (bloc temporel de durée $T = 100ms$)
- Consigne de vitesse de tractage : $2m.s^{-1}$
- Pot "Pot 1" (fig. 3.22) piloté par un sinus 700 Hz
- Pot "Pot 2" (fig. 3.22) piloté par un sinus 700 Hz
- Grille de calcul $\mathbf{x}(t) = [X_1(t), ..., X_L(t)]^T$ de longueur 30m centrée sur la maquette AMANDA à chaque instant
- Dérive au CPA : 0,19m (vers le Nord)
- Trajectoire du centre de la maquette AMANDA selon x : $x(t) = -7,6m + v.t$
- Antenne linéaire régulière de 9 microphones espacés de 50cm en x
- Nombre de blocs utilisés pour le calcul : 159 blocs avec un recouvrement de 50%

TABLE 3.6 – Configuration expérimentale de la simulation réaliste de deux sources tonales en basse fréquence.

Rapport Signal Sur Bruit (RSB)

Afin d'évaluer le RSB de la mesure, l'autospectre du signal mesuré au niveau de l'hydrophone H_5 de l'antenne (fig. 3.20) dans la configuration de la table 3.6 est représenté en vert sur la figure 3.33 pour une consigne de vitesse de 2 m.s^{-1} . Ce signal contient donc l'information sur les sources d'intérêt mais également une mesure du bruit de fond. Sur cette figure, l'autospectre du bruit de fond mesuré par ce même hydrophone est représenté en rouge pour la même portion de trajectoire. Le bruit de fond étant ici composé du bruit ambiant du lac de Castillon et du bruit de passage de la maquette AMANDA.

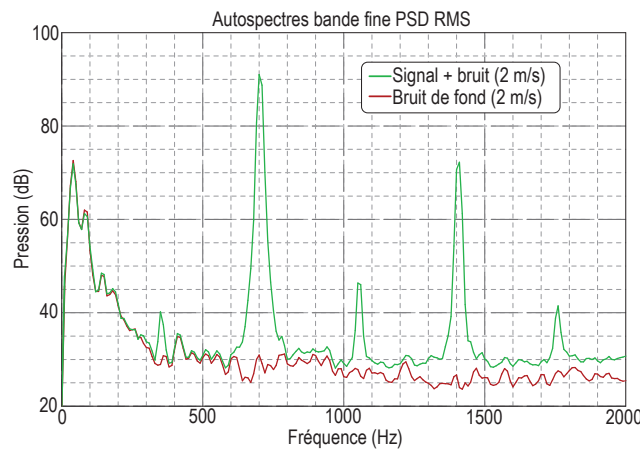


FIGURE 3.33 – Configuration pour l'application du traitement d'antenne synthétique : Autospectres en bande fine de l'hydrophone H_5 , pour la configuration d'étude en vert et pour le bruit de fond en rouge.

Pour cette configuration de sources tonales, le rapport signal sur bruit à 700 Hz est très bon, supérieur à 40 dB, et donc suffisant pour les traitements d'antenne, d'après la figure 3.33.

Construction de l'antenne synthétique

Dans ce paragraphe, nous proposons d'agrandir l'antenne réelle de 9 hydrophones, $\{A_m\}_{1..9}$, par deux fois sa longueur. L'antenne synthétique totale, $\{\{V_m\}_{1..4}, \{A_m\}_{1..9}, \{V_m\}_{5..8}\}$, possède donc 17 hydrophones portant ainsi sa longueur virtuelle à 8 mètres. Le schéma de la figure 3.34, illustre la géométrie de l'antenne synthétique ainsi construite.

De la même façon que dans les simulations présentées dans le paragraphe 2.4.3.2, l'antenne réelle de 9 hydrophones est agrandie en définissant des sous-antennes de 5 hydrophones de part et d'autres d'elle-même. Les sous-antennes de 5 hydrophones virtuels sont construites avec un hydrophone en recouvrement avec la sous-antenne précédente.

La figure 3.35 représente les valeurs des indicateurs T_1 en trait continu et T_2 en tirets en

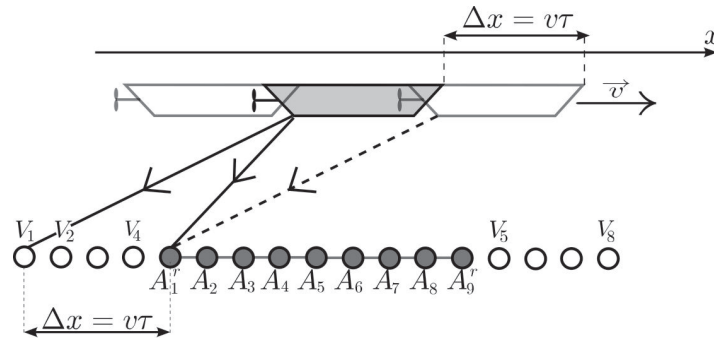


FIGURE 3.34 – Schéma de la construction de l'antenne synthétique de 17 hydrophones $\{\{V_m\}_{1..4}, \{A_m\}_{1..9}, \{V_m\}_{5..8}\}$ à partir de l'antenne réelle de 9 hydrophones $\{A_m\}_{1..9}$.

fonction de l'instant correspondant à chaque bloc temporel. La figure 3.35a représente les valeurs des indicateurs pour le capteur réel en recouvrement A_1^r et la figure 3.35b représente les valeurs des indicateurs pour le capteur réel en recouvrement A_9^r .

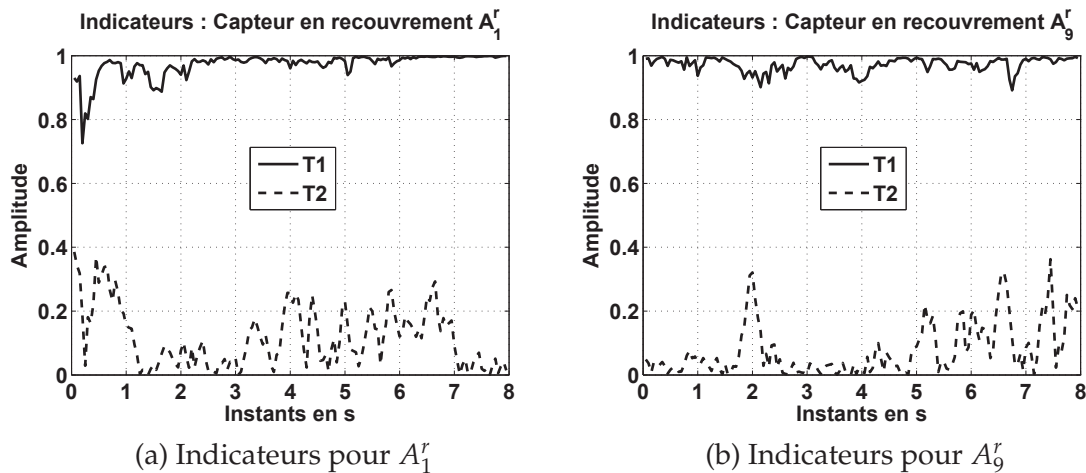


FIGURE 3.35 – Valeurs des indicateurs T_1 en trait continu et T_2 en tirets pour l'hydrophone réel en recouvrement A_1^r (a) et l'hydrophone réel en recouvrement A_9^r (b).

D'après les figures 3.35a et 3.35b, les indicateurs T_1 sont proches de 1 et les indicateurs T_2 sont proches de 0, ce qui témoigne d'une bonne synchronisation des couples d'hydrophones en recouvrement et donc des sous-antennes virtuelles construites. Pour ce cas de synthèse d'ouverture, la durée d'acquisition de 8 secondes correspond à la durée maximale d'acquisition possible pour la construction d'une antenne synthétique deux fois plus longue que l'antenne réelle. En effet, dans une étude qui n'est pas rapportée ici, il a été montré que des blocs temporels définis au-delà des 8 secondes d'acquisition présentaient des mauvaises valeurs d'indicateurs témoignant ainsi d'un échec de synchronisation.

L'antenne synthétique totale qui est utilisée dans la suite de cette section est donc l'en-

semble $\{\{V_m\}_{1..4}, \{A_m\}_{1..9}, \{V_m\}_{5..8}\}$.

Résultats de localisation de sources

Afin d'attester l'amélioration de la résolution des deux sources tonales en basses fréquences par ce traitement d'ouverture synthétique, le résultat de localisation du Beamforming-MS obtenu avec l'antenne réelle de 9 hydrophones est représenté en tirets et avec l'antenne synthétique totale de 17 hydrophones en trait continu sur la figure 3.36a.

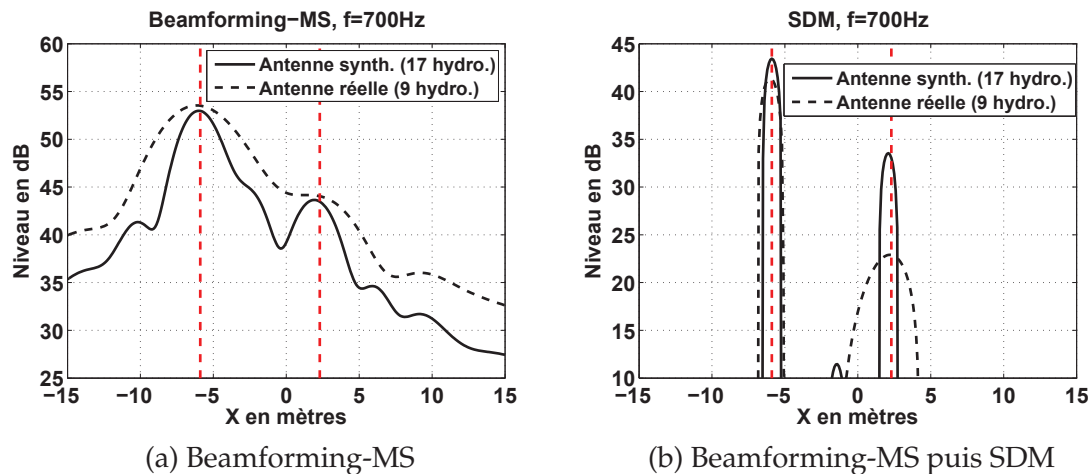


FIGURE 3.36 – Résultats de localisation de sources à 700 Hz par Beamforming-MS (a) et après déconvolution par SDM (b). Résultat de localisation avec l'antenne réelle de 9 hydrophones en tirets et résultat de localisation avec l'antenne synthétique de 17 hydrophones en trait continu. Les positions des pots vibrants dans la maquette AMANDA sont représentées par les tirets verticaux rouges.

Au vu des résultats de Beamforming-MS de la figure 3.36a, on constate que l'antenne réel de 9 hydrophones ne permet pas de localiser les deux sources. Le traitement d'antenne synthétique permet d'améliorer la résolution de localisation car la largeur des lobes de localisation est réduite par rapport à celle obtenue avec l'antenne réelle. Cependant, le traitement d'ouverture ne permet pas d'attester de la localisation des deux pots vibrants au vu des résultats de Beamforming-MS. En effet, d'après la figure 3.36a, seule la source associée au pot "Pot 1" est localisée en l'abscisse $x = -5,9m$. Le premier lobe secondaire de cette source est lissé par le mouvement et localisé en $x = -2,4m$. La dynamique de localisation de cette source est 8,25 dB avec ce lobe secondaire. Le lobe de localisation au niveau du pot "Pot 2" ne peut alors être interprété comme une source acoustique localisée car son niveau est inférieur au niveau du lobe secondaire de 1 dB.

La figure 3.36b présente le résultat de localisation obtenu après déconvolution par SDM avec l'antenne réelle de 9 hydrophones en tirets et avec l'antenne synthétique totale de 17 hydrophones en trait continu. On constate que l'antenne réelle permet de localiser les deux sources sans artefact après déconvolution par SDM. Les deux pots vibrants sont localisés

correctement avec une erreur de localisation très faible de $-0,1m$. L'antenne synthétique de 17 hydrophones permet de parfaitement localiser le pot "Pot 1" et de bien localiser le pot "Pot 2" avec une erreur de localisation de $-0,2m$, après déconvolution par SDM. L'antenne synthétique permet également d'améliorer la résolution de localisation après déconvolution par SDM. En effet, l'énergie de la source associée au pot "Pot 2" est étalée sur 5 mètres dans le résultat de localisation par l'antenne réelle (fig. 3.36b, en tirets) alors qu'elle n'est étalée que sur 1,5 mètres dans le résultat de localisation par l'antenne synthétique (fig. 3.36b, en trait continu). Pour estimer la contribution de la source associée au pot "Pot 2", il faudra donc définir une zone de contribution plus étendue pour l'antenne réelle.

3.3.4 Conclusions

Les résultats obtenus lors des expérimentations au lac de Castillon ont montré que la méthode initiale de localisation et de contribution de sources permettait d'analyser les mesures de bruit de passage de navire en environnement sous-marin.

La méthode d'ouverture synthétique passive a donc été validée sur cette expérimentation en eau car la résolution en localisation du Beamforming-MS a été améliorée. Cependant, le cas d'application du traitement d'antenne synthétique a concerné deux sources d'amplitudes différentes d'environ 10 dB. Malgré l'amélioration de la résolution de localisation du Beamforming-MS, sa dynamique de localisation n'a pas permis d'attester de la localisation de la source la plus faible, *i.e.* la source associée au pot "Pot 2". La déconvolution du Beamforming-MS par SDM a permis de localiser les deux sources avec l'antenne réelle et l'antenne synthétique. Le résultat de déconvolution avec l'antenne synthétique a présenté une meilleure résolution de localisation qu'avec l'antenne réelle confirmant ainsi l'amélioration de la résolution par synthèse d'ouverture.

3.4 Conclusions et perspectives des expérimentations

Dans un premier temps, une expérimentation en air à échelle réduite a été réalisée et a permis d'effectuer une première phase de validation de la faisabilité de la méthode initiale de localisation et de contribution de sources pour l'étude du bruit de passage d'un véhicule. En effet, cette expérience a été réalisée à échelle humaine et dans un environnement maîtrisé ce qui a permis d'avoir une méthode de trajectographie précise par tachymétrie. Cette expérimentation a également permis d'appliquer l'algorithme de correction acoustique de la trajectoire proposé dans le chapitre 2 et a montré que ce traitement permettait de bien estimer la trajectoire réelle du véhicule et ainsi d'améliorer les performances en localisation du Beamforming-MS.

Dans un deuxième temps, une expérimentation en eau de plus grande envergure a été réalisée avec l'aide du personnel de la DGA afin de valider la faisabilité de la méthode initiale et de ses améliorations dans la configuration de l'application industrielle visée. Pour ces

expérimentations, une maquette de navire de surface a été utilisée et instrumentée avec des pots vibrants. Le système de trajectographie utilisée au lac de Castillon s'est révélé relativement précis et des résultats exploitables ont été possibles sans correction de trajectographie. La méthode initiale a été validée sur une configuration de sources de navire réaliste artificiellement réalisée à l'aide de pots vibrants. Le traitement d'ouverture synthétique passive a été appliqué sur une configuration de deux sources sinusoïdales afin d'améliorer la résolution de localisation de la méthode de Beamforming-MS. Du fait de la différence d'amplitude entre sources, le Beamforming-MS avec l'antenne réelle et l'antenne synthétique n'a pas permis d'attester de la localisation des deux pots vibrants. Après déconvolution par la méthode SDM, les deux pots vibrants ont pu être localisés et le résultat de localisation obtenu avec l'antenne synthétique a présenté une meilleure résolution de localisation.

Concernant les données acquises au lac de Castillon, elles constituent une importante base de données expérimentales de bruit de passage de maquette de frégate, avec différentes configurations de sources et à différentes vitesses de tractage. Les sources acoustiques ont été générées en utilisant des excitations mécaniques de pots vibrants et de haut-parleurs disposés à l'intérieur de la carène de la maquette. Ces mesures uniques permettent d'appliquer des méthodes de caractérisation de signature acoustique, *i.e.* de localisation de sources et de contribution de sources, dans un environnement représentatif de l'environnement réel de la mesure de bruit de passage d'un navire dans son utilisation opérationnelle. Plusieurs mesures de bruit de passage de maquettes de frégate avec des antennes acoustiques ont été publiées récemment par De Jong *et al.* [Jong 2009] mais ont été réalisées dans un environnement confiné de bassin d'essais des carènes. Cet environnement fortement bruyé n'est pas représentatif de l'environnement réel de l'étude du bruit de passage généré par un navire de surface en utilisation opérationnelle.

Conclusion et perspectives

Conclusions

Des problématiques générales sur l'étude de la signature acoustique d'un navire de surface à l'échelle individuelle ont été formulées en introduction de cette thèse.

Tout d'abord, la seule étude de la littérature publique concernant l'imagerie acoustique passive d'un navire de surface au moyen d'une antenne est celle de De Jong *et al.* [Jong 2009]. Cependant, elle n'a pas vocation à proposer un système industriel pour la mesure systématique de signature acoustique de navires civils, contrairement à la présente étude. Au cours de cette thèse, une expérimentation d'imagerie acoustique passive de navire au passage a été dimensionnée et réalisée pour constituer la première base de données publiques de mesures de bruit de passage de navire de surface par antenne hydrophonique. Les méthodes proposées au cours de cette thèse ont montré de bonnes performances pour localiser des sources acoustiques artificielles et naturelles et évaluer leur contribution énergétique relative dans la signature globale en fonction de la fréquence.

De plus, de nombreuses sources acoustiques existent et contribuent à la signature acoustique globale d'un navire de surface. Les résultats de localisation de sources rapportés dans l'annexe C ont montré que l'utilisation d'une maquette de navire de surface permettait d'isoler les sources hydroacoustiques associées au mouvement du navire et que les méthodes proposées permettaient d'isoler les sources associées à l'étrave et à la poupe. Ce protocole expérimental permet donc de fournir un diagnostic acoustique et d'identifier la contribution énergétique d'une zone du navire en particulier.

Enfin, la DCSMM a préconisé la surveillance des bandes de tiers d'octave de fréquences centrales 63 Hz et 125 Hz qui sont principalement dominés par des sources tonales. L'utilisation d'une antenne réduite limite la résolution de localisation en basses fréquences. Le traitement d'antenne à ouverture synthétique a présenté des performances robustes lors de son application aux données mesurées au lac de Castillon et constitue une solution faisable pour traiter les sources tonales des tiers d'octave de fréquences centrales 63 Hz et 125 Hz.

Pour pouvoir concevoir ce système d'imagerie acoustique passive, les travaux ont été organisés en trois étapes :

1. l'étude des sources acoustiques sous-marines d'un navire de surface au passage
2. l'amélioration de méthodes existantes de localisation-contribution de sources
3. l'application de ces méthodes de traitement d'antenne à des données d'expérimentation à échelle réduite

Le premier chapitre a permis de recenser les différentes sources acoustiques d'un navire de surface au passage et d'identifier les principales sources contribuant à la signature acoustique d'un navire. Ces travaux ont été réalisés au moyen d'une étude bibliographique.

Les expérimentations de mesures de bruit de passage de navire sont coûteuses. Nous avons donc construit un simulateur du rayonnement acoustique d'un navire en mouvement en

utilisant les modélisations de quelques sources principales de navires et la modélisation de la propagation acoustique sous-marine d'une source ponctuelle mobile par la théorie des rayons. Ce simulateur simple et réaliste de sources et de propagation acoustique sous-marine a permis :

- de mesurer les performances en localisation-contribution des méthodes,
- d'étudier les performances des méthodes en présence d'erreurs de modèle,
- de générer les signaux des sources acoustiques utilisés en expérimentation,
- de comparer les performances en simulation et en expérimentation.

Le deuxième chapitre de cette thèse a présenté, dans une première section, une synthèse de l'état de l'art des méthodes existantes de localisation-contribution de sources dans le domaine du bruit de passage. Cette étude a permis de proposer une méthode initiale basée sur la méthode de Beamforming-MS pour la localisation de sources mobiles et sur la méthode SDM pour l'estimation de la contribution des sources par déconvolution. De plus, cette étude bibliographique a permis de dimensionner une antenne de mesure avec une géométrie linéaire et régulière au vu des contraintes d'expérimentation.

Au moyen du simulateur de sources ponctuelles mobiles, les performances du Beamforming-MS ont été étudiées. Ces performances sont l'erreur de localisation, la résolution et la dynamique de localisation qui sont liées à la présence de la réponse d'antenne dans les résultats de localisation et dépendent de la fréquence. Ces performances se sont révélées robustes aux erreurs de modèle et à la cohérence entre plusieurs sources. Cette robustesse à la cohérence entre sources s'est observée également lors des expérimentations au lac de Castillon, la réponse vibroacoustique de la carène de la maquette AMANDA étant la contribution d'une somme de modes spatiaux. De plus, une dégradation de la dynamique de localisation a été constatée en présence de bruit de mesure et d'effets de bord dus à un choix de grille de calcul trop large. Dans les mesures aériennes, l'effet du bruit de mesure a été particulièrement important et visible dans l'étude des performances de l'antenne microphonique.

Par ailleurs, les performances de la déconvolution du Beamforming-MS par la méthode SDM ont été qualifiées au travers du simulateur de sources ponctuelles. Ces performances sont l'erreur de localisation, la dynamique de localisation et la contribution des sources. L'application de la méthode SDM sur des données simulées a montré que cette méthode ne permettait pas d'améliorer la dynamique de localisation de plus de la valeur du RSB. Les résultats de contribution de sources sont également dégradés par le bruit de mesure et les effets de bord, se traduisant par une forte contribution des sources non physiques.

La méthode initiale a été appliquée à une simulation réaliste avec la même configuration expérimentale que celle réalisée au lac de Castillon. L'estimation de la localisation des sources et de la contribution des sources a montré de bons résultats, ce qui a validé le choix de la méthode initiale pour cette étude.

Dans ce chapitre, nous proposons ensuite des améliorations de la méthode initiale pour améliorer les performances de la méthode initiale. Une nouvelle stratégie de pondération a permis d'éliminer les effets de bord améliorant ainsi la dynamique de localisation du Beamforming-MS. La contribution des sources non physiques a également été atténuée. Le nombre restreint d'hydrophones limite la résolution de l'antenne de mesure en basses fréquences. Cela est problématique pour l'étude de la signature acoustique d'un navire de sur-

face qui contient de nombreuses raies basses fréquences, associées aux bruits mécaniques. La deuxième amélioration consiste en la construction d'une antenne à ouverture synthétique plus grande que l'antenne réelle permettant d'améliorer la résolution en basses fréquences. Ce traitement n'est applicable que pour les sources périodiques. Une stratégie de synchronisation par bloc temporel issue de la littérature a permis de renforcer la robustesse du traitement aux erreurs de trajectographie. La dernière amélioration proposée dans cette thèse a été un algorithme de correction acoustique de la trajectographie par un pré-traitement de Beamforming-MS. Cette algorithme permet d'estimer une trajectoire corrigée qui améliore la dynamique de localisation des sources.

Le troisième chapitre a présenté l'application de la méthode initiale et des améliorations proposées à des données réelles mesurées lors d'expérimentation à échelle réduite en air et en eau. Les expérimentations ont été dimensionnées en considérant différents facteurs de similitude. Nous avons réalisé une expérimentation en air qui reproduit à échelle réduite l'expérience du lac de Castillon avec un système de mise en mouvement des sources semblable. Nous avons validé la méthode initiale sur le cas de deux sources de bruit blanc montrant ainsi l'utilité d'une telle méthode pour le traitement du bruit de passage d'un véhicule à faible vitesse en air. Sur ce dernier cas et en supposant une trajectoire *a priori* rectiligne, l'algorithme de correction acoustique de la trajectographie que nous avons proposé a été validé en comparant la trajectoire corrigée à la trajectoire estimée par tachymétrie. De plus, les résultats de localisation obtenus avec la trajectoire corrigée présentent de meilleurs performances que ceux obtenus avec la trajectoire rectiligne erronée.

La deuxième campagne de mesures réalisée dans cette thèse concernait des mesures de bruit de passage de maquette de navire de surface au lac de Castillon. Cette campagne de mesures constitue une alternative intéressante aux seules mesures de bruit de passage de maquette de navire de surface qui ont été publiées dans la littérature [Jong 2009] qui se sont déroulées dans un environnement réverbérant de bassin des carènes. Nous avons appliqué, sur ces données en lac, la méthode initiale. Nous avons obtenu avec cette méthode de bons résultats de localisation et de contribution de sources, conformes aux observations réalisées lors de l'analyse de la simulation de configuration réaliste.

Notre méthode de synthèse d'ouverture passive a été appliquée à un cas difficile de deux sources sinusoïdales basses fréquences. En effet, la distance entre les sources n'était pas suffisante pour que leurs localisations soient séparées par Beamforming-MS et elles étaient d'amplitudes différentes d'environ 10 dB. Les indicateurs de synchronisation ont permis de construire une antenne synthétique de taille donnée pour une durée de traitement la plus grande possible. Les résultats de localisation et de contribution ont démontré que le traitement d'antenne synthétique permettait d'améliorer la résolution en localisation de la méthode initiale.

Enfin, l'annexe C traite de l'étude du bruit hydrodynamique de la maquette de navire de surface au moyen de la méthode initiale et de la nouvelle stratégie de pondération du Beamforming-MS. Le dépouillement de ces mesures a permis d'estimer la localisation de la source associée à la brisure de la vague d'étrave et d'une source localisée au niveau de la poupe, pour deux vitesses $3,5\text{m.s}^{-1}$ et 5m.s^{-1} . Les localisations estimées ont été comparées aux résultats de De Jong *et al.* et ont permis de conclure sur le rebond de la vague d'étrave

qui rayonne acoustiquement en fonction de la vitesse. Ainsi, ce premier dépouillement de sources acoustiques réelles de navire de surface au passage a permis de montrer les capacités de l'outil d'imagerie acoustique construit au cours de cette thèse.

Perspectives

Les perspectives de ces travaux sont présentées en deux catégories : des améliorations des méthodes de traitement d'antenne proposées pour la localisation-contribution des sources de navire et des nouvelles pistes de recherche concernant l'étude de la signature acoustique d'un navire de surface en mouvement.

Améliorations des traitements d'antenne

Une première perspective pour l'amélioration des méthodes de traitement d'antenne est la compensation de l'effet Doppler afin d'estimer correctement la contribution des sources d'un navire passant à une vitesse supérieure à $3,5 m.s^{-1}$. En effet, le Beamforming-MS par bloc a été choisi dans cette thèse car il permettait :

- un temps de calcul réduit par rapport au Beamforming-MS par instant
- une formulation simple du problème de déconvolution de façon indépendante fréquence par fréquence

Si on considère une méthode initiale identique à celle proposée dans cette thèse, la prise en compte de l'effet Doppler intervient en premier lieu par l'utilisation du Beamforming-MS par instant. De plus, il sera nécessaire d'adapter les méthodes de déconvolution aux Beamforming-MS par instant en prenant en compte l'énergie des sources distribuées sur toute la bande de fréquences par effet Doppler. Concernant les méthodes de déconvolution étudiées dans cette thèse, DAMAS-MS et SDM, les algorithmes de ces méthodes sont peu contraints et reposent sur la connaissance *a priori* de la réponse d'antenne moyenne qui est souvent inexacte. De nouveaux algorithmes doivent être développés afin d'être robustes aux erreurs de la réponse d'antenne moyenne. Une piste de recherche serait de développer un algorithme de déconvolution aveugle estimant simultanément les autospectres de sources inconnues et la réponse d'antenne moyenne [Repetti 2015].

De plus, le traitement d'ouverture synthétique proposé permet d'améliorer la résolution de deux sources de fréquence pure en basses fréquences. Une perspective de ce travail est d'adapter l'algorithme de construction de l'antenne synthétique pour des sources dont la valeur de la fréquence évolue au cours du temps. En effet, les sources tonales qui sont étudiées en basses fréquences sont les sources associées au passage de pales du propulseur et les sources liées aux machines internes. Les fréquences de ces sources évoluent au cours du temps en raison de la non stabilité du régime du propulseur et des autres machines tournantes. Il est donc nécessaire de pouvoir réaliser une antenne à ouverture synthétique adaptée aux sources en fonction de la fréquence.

Concernant les sources aléatoires large bande, le traitement actuel de synthèse d'ouverture ne permet pas de synchroniser de telles sources. Les méthodes permettant d'améliorer la résolution de sources large bande en basses fréquences sont encore limitées. Une piste de

recherche investiguée dans le projet ARMADA est le couplage d'information de séparation de sources avec les résultats de localisation de sources [Ouedraogo 2014]. En effet, en tirant profit de contraintes sur la positivité des autospectres inconnus de sources, il est possible de séparer différentes composantes sources au niveau des pressions mesurées par les hydrophones [Ouedraogo 2014]. La séparation de sources permet la séparation fréquentielle des sources, la localisation des sources apporte donc une information complémentaire à celle-ci. Ainsi, séparer deux sources large bande en basses fréquences puis localiser chacune permettrait de décomposer le problème pour le simplifier.

Études acoustiques en perspectives

Comme évoqué dans le chapitre 3, le lac de Castillon est un environnement possédant des propriétés de propagation acoustique intéressantes et présentant un très faible bruit de fond. De plus, le système de tractage équipant le lac permet des tirs de la maquette de navire de surface avec un mouvement rectiligne et quasi-uniforme. Ces moyens d'expérimentation sont donc particulièrement adaptés à l'étude du bruit de passage de maquette de navire de surface ce qui est moins le cas d'un bassin des carènes qui est un milieu confiné [Jong 2009]. Le bruit hydrodynamique associé au passage de la maquette dans l'eau a été étudié partiellement dans l'annexe C, il reste à estimer la contribution énergétique du sillage de la maquette relativement aux sources acoustiques localisées autour de la maquette.

De plus, comme l'a été affirmé par De Jong *et al.* [De Jong 2005], un travail de corrélation des mesures acoustiques avec les prédictions numériques des sources hydroacoustiques associées au mouvement du navire est également une piste de recherche innovante pour la compréhension des phénomènes physiques à l'origine des sources.

Enfin, les travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre d'une étude de faisabilité industrielle d'un outil de mesure de signature acoustique de navire à coût réduit. Des expérimentations en mer dans la configuration d'utilisation finale de l'outil matériel et logiciel sont à prévoir. Pour ce type d'expérimentation, des méthodes devront être développées pour rejeter et atténuer les localisations de sources non physiques générées par les sources de bruit, situées dans l'environnement extérieur, telles que d'autres navires. De plus, l'algorithme de correction acoustique de la trajectographie sera utile pour des expérimentations de bruit de passage en mer. En effet, l'état de surface est beaucoup plus perturbé en mer qu'en lac, le mouvement du navire sera donc plus sujet à des variations. Il sera donc intéressant de pouvoir corriger ces erreurs de trajectographie en utilisant l'algorithme proposé dans cette thèse et en lui proposant éventuellement des améliorations.

Démonstration de l'équation (1.22)

Pour déterminer les amplitudes modales des déplacements vibratoires, l'utilisation de l'équation du mouvement généralisée est proposée par Laulagnet [Laulagnet 1989]. L'équation du mouvement généralisée est déduite de l'équation (1.15) en utilisant la propriété d'orthogonalité des modes. L'orthogonalité des modes est une orthogonalité par rapport à l'opérateur de raideur, par rapport à l'opérateur de masse, par rapport à la pression et par rapport à l'excitation. Cela se traduit par les définitions, pour une plaque de surface Σ :

- d'une raideur généralisée K_{nm} avec $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ exprimée comme :

$$\int_{\Sigma} \Phi_{nm}(x, y) D \nabla^4 [\Phi_{pq}(x, y)] d\Sigma = K_{nm} \delta_{np} \delta_{mq} \quad (\text{A.1})$$

- d'une masse généralisée M_{nm} avec $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ exprimée comme :

$$\int_{\Sigma} \rho h \Phi_{nm}(x, y) \Phi_{pq}(x, y) d\Sigma = M_{nm} \delta_{np} \delta_{mq} = M_s \frac{bd}{4} \quad (\text{A.2})$$

- d'une force généralisée F_{nm} avec $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ exprimée comme :

$$\int_{\Sigma} F \delta(x - x_e) \delta(y - y_e) \Phi_{nm}(x, y) dx dy = F_e \Phi_{nm}(x_e, y_e) = F_{nm} \quad (\text{A.3})$$

- d'une pression généralisée P_{nm} avec $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ exprimée comme :

$$\int_{\Sigma} p_s(x, y, z_0) \Phi_{nm}(x, y) d\Sigma = P_{nm} \quad (\text{A.4})$$

La pression généralisée s'exprime comme suit :

$$P_{nm} = j\omega \sum_{p=1}^{+\infty} \sum_{q=1}^{+\infty} a_{pq} Z_{nmpq} \quad (\text{A.5})$$

Avec la matrice d'impédance intermodale de rayonnement qui s'exprime en fonction des transformées de Fourier spatiales des déformées modales avec k_x et k_y les nombres d'onde selon x et selon y :

$$Z_{pqnm} = \frac{\rho\omega}{4\pi^2} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \frac{\Phi_{nm}(k_x, k_y) \Phi_{pq}(k_x, k_y)}{k_z} dk_x dk_y \quad (\text{A.6})$$

Cette impédance intermodale de rayonnement reflète le couplage entre les modes de vibrations : chaque mode est influencé par les autres modes. Dans des milieux fluides légers tels que l'air, le couplage intermodal est négligeable, *i.e.* $Z_{pqnm} \approx 0, \forall (p, q, n, m) \in \mathbb{N}^4$. Dans des

milieux fluides lourds, ce couplage est non négligeable. Cependant, pour le cas de l'eau, il est classiquement admis que seul les termes diagonaux $Z_{nnmm}, \forall (n, m) \in \mathbb{N}^2$ de la matrice d'impédance intermodale (eq. (A.6)) sont significatifs. Cela revient à considérer l'interaction d'un mode avec lui-même sous l'effet de la présence du fluide. Dans la littérature, plusieurs méthodes sont proposées pour calculer l'intégrale de l'équation (A.6). Une bonne méthode est celle de Laulagnet [Laulagnet 1998] car elle est rigoureuse mais coûteuse en temps de calcul (intégration numérique), le temps de calcul peut être amélioré en modélisant la plaque comme une distribution de pistons élémentaires dont l'impédance de couplage intermodal est analytique [Hu 2012].

De ces grandeurs généralisées découle l'équation du mouvement généralisée faisant intervenir les amplitudes modales inconnues du problème, pour le mode $(n, m) \in \mathbb{N}^2$:

$$K_{nm}a_{nm} - M_{nm}\omega^2 a_{nm} + j\omega Z_{nnmm}a_{nm} = M_{nm}(\omega_{nm}^2 - \omega^2)a_{nm} + j\omega Z_{nnmm}a_{nm} = F_{nm} \quad (\text{A.7})$$

L'équation (1.22) est ensuite obtenue pour le mode $(n, m) \in \mathbb{N}^2$:

$$a_{nm} = \frac{F_{nm}}{M_{nm}(\omega_{nm}^2 - \omega^2) + j\omega Z_{nnmm}} \quad (\text{A.8})$$

Effet du mouvement des sources sur le traitement d'antenne

Dans la section 1.4, la modélisation de la propagation des ondes acoustiques rayonnées par une source mobile a mis en évidence l'effet Doppler (eq. (1.53)), le décalage en fréquences affectant les signaux source et induit par le mouvement relatif entre les sources et l'antenne. L'effet Doppler est calculé pour la configuration d'étude afin d'en évaluer son influence sur les traitements d'antenne. L'effet Doppler est négligeable, si sa variation sur toute la durée du passage étudiée est inférieure à la résolution fréquentielle Δf des traitements. En effet, en formation de voies, l'utilisation de la transformée de Fourier court terme permet d'améliorer la vitesse de calcul en comparaison à une méthode temporelle. Cependant, cette transformée utilise des tranches temporelles de durée T , qui impose une résolution fréquentielle $\Delta f = \frac{1}{T}$, il faut donc évaluer la nécessité de corriger cet effet Doppler qui impliquerait et donc la faisabilité d'appliquer cette stratégie court terme.

L'effet Doppler dépend de l'angle de vue d'un point de mesure A_m par un point source S_n qui est défini comme étant l'angle entre la trajectoire de la source et la droite reliant le point S_n à au point A_m , il est noté θ_s sur la figure B.1.

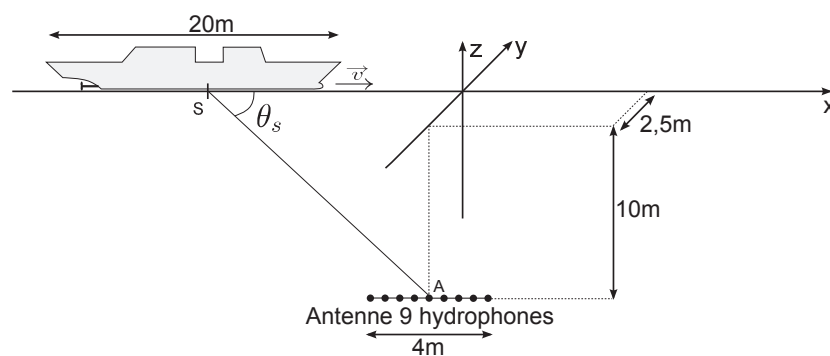


FIGURE B.1 – Schéma de la configuration de l'étude de l'influence de l'effet Doppler.

L'effet Doppler redistribue l'énergie d'une fréquence source sur les fréquences voisines, le décalage en fréquence s'exprime par la différence entre la fréquence reçue f et la fréquence

émise par la source f_s :

$$\Delta\text{dop} = f - f_s = f_s \left(\frac{1}{1 - Ma \cos \theta_s} - 1 \right) \quad (\text{B.1})$$

. Comme il l'a été évoqué précédemment l'effet Doppler dépend directement du point source, du point de mesure et de l'angle de vue entre ces deux points. La nécessité de corriger l'effet Doppler réside dans le fait que les ondes acoustiques émises par différents points du navire soient affectés d'un effet Doppler non négligeable et différent lorsqu'elles sont reçues sur chaque capteur de l'antenne. Ainsi, il convient donc d'évaluer la variation du décalage de fréquence par effet Doppler entre les extrémités droite (d) et gauche (g) du navire et les capteurs extrêmes de l'antenne sur toute la durée de la trajectoire étudiée, elle est notée :

$$\begin{aligned} \Delta\text{dop}_{d-g} &= \Delta\text{dop}_d - \Delta\text{dop}_g \\ &= f_s \left(\frac{1}{1 - Ma \cos \theta_d} - \frac{1}{1 - Ma \cos \theta_g} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Cette étude est réalisée pour différents paramètres : la vitesse des sources, la portion de trajectoire du navire considérée, la résolution fréquentielle des traitements.

La figure B.2a et la figure B.2b représentent les fréquences maximales au-delà de laquelle, la variation de l'effet Doppler sur le passage du navire varie de plus de la résolution fréquentielle Δf pour des vitesses de navire de $v = 2\text{m.s}^{-1}$ et $v = 5\text{m.s}^{-1}$. Elles sont évaluées en fonction de la portion de trajectoire parcourue par le navire et en face de l'antenne pour différentes distances entre le plan de la trajectoire et l'antenne. Ainsi, l'effet Doppler est négligeable sur une bande fréquentielle $[500\text{Hz}; 1500\text{Hz}]$, bande passante d'une antenne régulière de 9 hydrophones et 4m de long. Il est donc possible d'appliquer des traitements court terme sur cette bande de fréquences et pour ces paramètres.

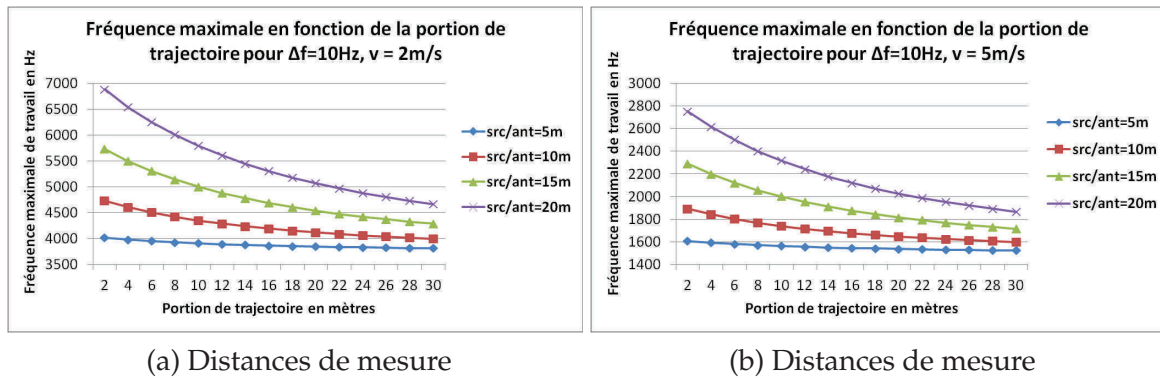


FIGURE B.2 – Évolution du seuil maximal de fréquences au-delà duquel l'effet Doppler n'est pas négligeable en fonction de la portion de trajectoire d'étude et pour différentes distances source/antenne.

La figure B.3a représente les mêmes quantités que la figure B.2 pour une vitesse de navire $v = 5\text{m.s}^{-1}$ et une distance de mesure de 10m correspondant à la configuration expérimentale visée. D'après cette figure, la résolution fréquentielle doit être au moins égale à 10Hz

pour pouvoir réaliser un traitement court terme jusqu'à $f = 1500\text{Hz}$. La figure B.3b représente les mêmes quantités que la figure B.2 pour une résolution $\Delta f = 10\text{Hz}$ et une distance de mesure de 10m pour différentes vitesses. Cette figure montre que pour ces paramètres de la configuration d'étude, il faudra corriger l'effet Doppler pour des vitesses de navire de $v = 5\text{m.s}^{-1}$ si des résultats doivent être calculés au-delà de $f = 1500\text{Hz}$

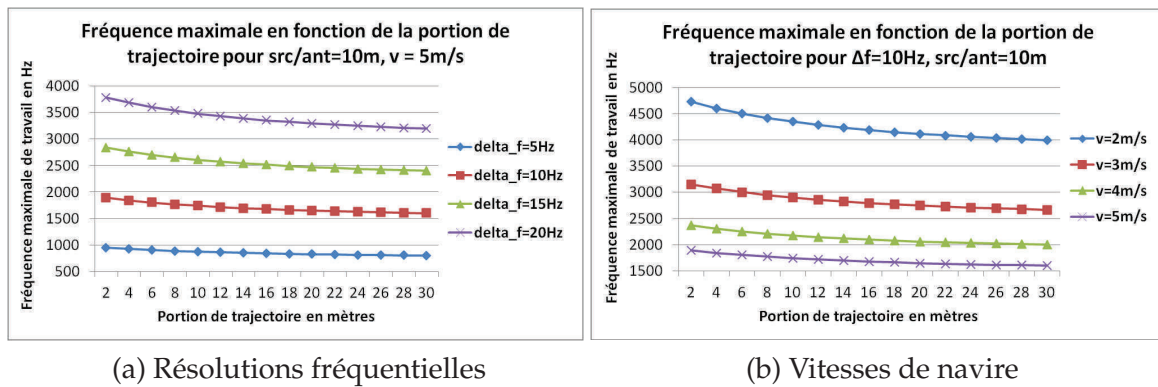


FIGURE B.3 – Évolution du seuil maximal de fréquences au-delà duquel l'effet Doppler n'est pas négligeable en fonction de la portion de trajectoire d'étude et pour différentes résolutions fréquentielle (à gauche) et différentes vitesses (à droite).

Localisation des sources acoustiques associées au mouvement de la maquette AMANDA

Cette annexe technique présente une application des méthodes de localisation de sources proposées dans cette thèse pour l'étude des sources acoustiques propres à la maquette AMANDA, associées à son mouvement. Le rayonnement acoustique de ces sources est mesuré dans une configuration pour laquelle toutes les sources artificielles sont éteintes (pots vibrants, haut-parleurs). Ces sources sont générées par divers phénomènes physiques telles que la brisure de la vague d'étrave, le sillage de la proue, le sillage de la poupe, les divers tourbillons générés par les appendices et les résonances de cavités sur la carène.

Nous rappelons que les niveaux de pression acoustique affichés dans cette annexe sont des *niveaux de pression acoustique relatifs*.

Des enjeux scientifiques existent concernant la mesure de ce type de sources acoustiques. En effet, De Jong *et al.* identifient trois besoins relatifs à ce domaine de recherche [De Jong 2005] :

1. Les niveaux de pression acoustique rayonnée par les sources acoustiques associées au mouvement d'un navire de surface sont faibles et souvent masqués par le niveau des autres sources comme observé dans la section 3.3.
2. Ces sources hydroacoustiques sont générées par des phénomènes physiques compliqués car ils peuvent interagir entre eux et des outils théoriques et expérimentaux sont nécessaires pour comprendre le rayonnement acoustique de ces sources.
3. L'utilisation de maquette de navire de surface est intéressante puisqu'elle permet d'isoler uniquement les sources hydroacoustiques associées au mouvement d'un navire de surface mais les lois de similitudes (voir sous-section 3.1.1) ne sont souvent pas faciles à déterminer pour reproduire à l'échelle d'une maquette l'hydrodynamique d'une frégate de taille réelle.

Des premiers travaux ont donc été menés pour l'étude expérimentale de ces sources avec des antennes linéaires et publiés par De Jong *et al.* [Jong 2009]. Ces travaux ne concernent que la localisation des sources et présentent une résolution encore limitée. De plus, ces mesures acoustiques ont été réalisées dans un bassin d'essais des carènes qui est un milieu de propagation confiné et plutôt adapté aux études hydrodynamiques qu'aux études acoustiques. Un important nombre de réflexions des ondes acoustiques bruite les mesures acoustiques.

La configuration expérimentale réalisée au Site d'Essais Sonar et Acoustique du lac de Castillon de la DGA est donc particulièrement adaptée à la caractérisation de la signature acoustique d'un navire au passage. En effet, le lac de Castillon est un milieu de propagation acoustique sous-marine suffisamment profond et étendu pour s'affranchir de la plupart des réflexions des ondes acoustiques, sauf celles sur la surface. De plus, il bénéficie d'un très faible niveau de bruit de fond notamment en hiver. De ce fait, lors des expérimentations, seul le bruit rayonné par la maquette AMANDA a pu être mesuré.

Ainsi, dans cette annexe, nous présentons d'abord succinctement les travaux de De Jong *et al.* notamment leurs résultats de localisation de sources, auxquels seront comparés les résultats obtenus sur la maquette AMANDA. Ensuite, nous présentons les résultats de localisation pour les sources acoustiques localisées autour de la maquette AMANDA pour deux consignes de vitesse de tractage différentes : $3,5m.s^{-1}$ et $5m.s^{-1}$. Enfin, des conclusions et des perspectives de ces résultats sont discutées.

C.1 Revue bibliographique de la mesure de bruit de passage de navire de surface

La littérature publique des mesures de bruit de passage de navire de surface est pauvre et récente. En effet, seul De Jong *et al.* ont réalisé ce type de mesures [Jong 2009]. Dans cette section, nous résumons les résultats de De Jong *et al.* sur l'analyse de mesures des sources acoustiques d'une maquette de navire de surface au passage avec une antenne linéaire d'hydrophones [De Jong 2005, Jong 2009]. Ces mesures sont réalisées sur des maquettes de navire de surface tractées, ce qui permet de s'affranchir de toutes les sources internes et des sources de propulseur existantes sur un navire réel. Les expériences de tractage de maquettes de navire de surface de De Jong *et al.* sont intéressantes puisqu'ils utilisent deux antennes linéaires alignées dans la direction de tractage des maquettes pour estimer la localisation des sources dans la longueur de la maquette, ce qui est une configuration expérimentale proche de celle réalisée au lac de Castillon.

C.1.1 Un projet de recherche

Le contexte de ces travaux est un projet collaboratif américano-néerlandais entre le centre américain *Naval Surface Warfare Center - Crane Division* (NSWCCD), l'organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO) et la société néerlandaise MARIN. Ce projet, intitulé *Mechanisms and prediction of surface ship radiated flow noise* (2004-2008), avait pour objectif de déterminer et quantifier les sources hydroacoustiques d'un navire de surface au passage à différentes vitesses et pour différentes géométries de coque au moyen d'expériences de maquette tractée et de calcul fluide numérique. Les sources d'intérêt étaient, par exemple, les sources de carène excitée par la couche limite turbulente et les sources associées à la vague d'étrave (voir section 1.2.3).

C.1.2 Liste des sources acoustiques théoriques

Dans leur article, De Jong *et al.* ont listé les sources acoustiques théoriques qu'ils supposent exister dans la signature acoustique d'une maquette de navire de surface au passage dépourvu de propulseur et de machines internes. Les sources qu'ils ont identifiées sont annotées sur la figure C.1.

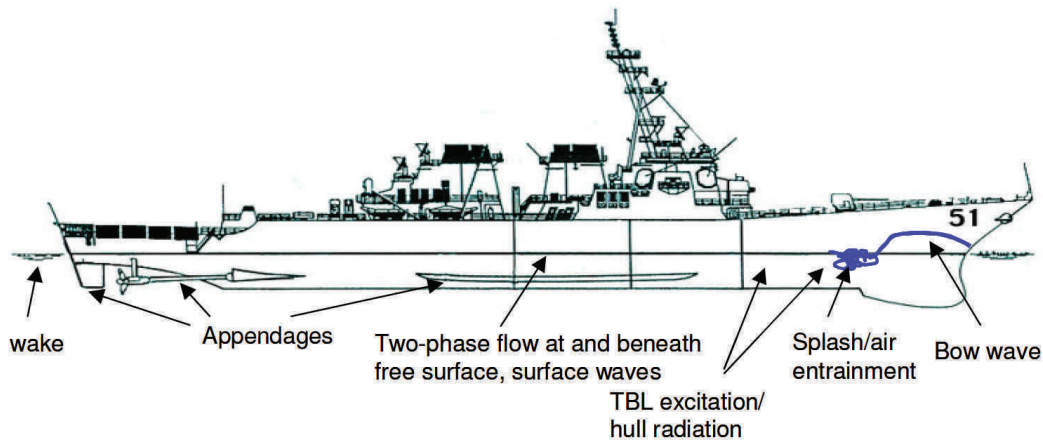


FIGURE C.1 – Schéma et liste des sources hydroacoustiques d'un navire de surface au passage, extrait de l'article de De Jong *et al.* [Jong 2009].

C.1.3 Localisation des sources de bruit de passage de maquettes de navire de surface

Dans le bassin d'essais des carènes de la société MARIN, des expériences de tractage à des vitesses de 2m.s^{-1} , 3m.s^{-1} et $3,5\text{m.s}^{-1}$ d'une maquette de navire de surface de 11,65 mètres de long ont été réalisées. Ce bassin de tractage est un milieu de propagation acoustique sous-marin confiné de longueur 240 mètres, de largeur 18 mètres et de profondeur 8 mètres. Dans un tel environnement, les mesures acoustiques sont bruitées car beaucoup de réflexions acoustiques non désirées existent. Pour cette étude, deux antennes linéaires sont utilisées : une antenne de 8 hydrophones B&K 8103 espacés régulièrement de 2,5 centimètres et une antenne de 8 hydrophones B&K 8103 espacés régulièrement de 20 centimètres. Les pressions mesurées par ces antennes sont combinées par intercorrélation temporelle de telle sorte à avoir une antenne totale de bande fréquentielle d'utilisation $[1\text{kHz}; 30\text{kHz}]$. Ces deux antennes sont positionnées à 2 mètres en dérive et 70 centimètres en profondeur, en champ proche du navire pour tenter de s'affranchir des problématiques de confinement. La géométrie de leur configuration expérimentale est représentée schématiquement sur la figure C.2.

Les traitements réalisés pour ces études ne sont pas explicités. Leurs résultats de locali-

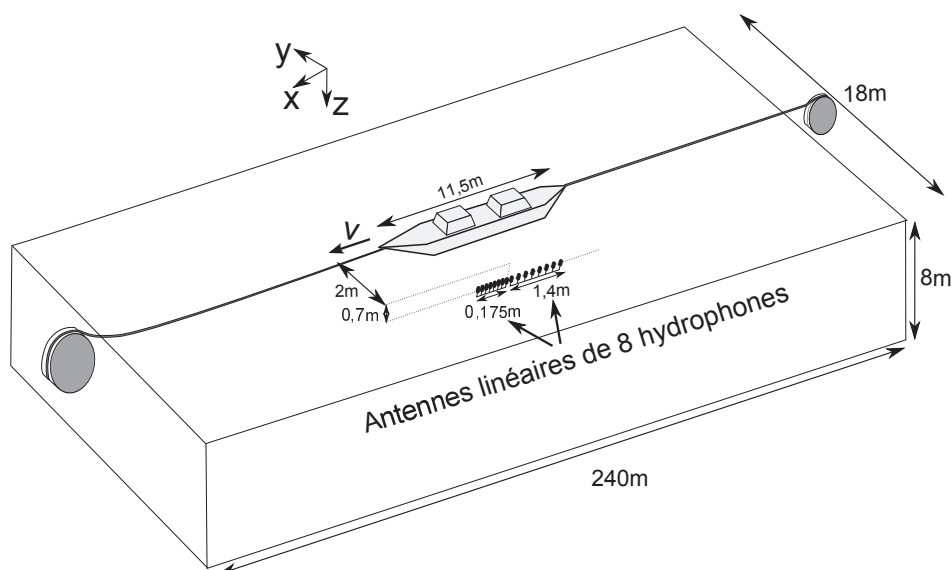


FIGURE C.2 – Schéma de la configuration expérimentale réalisée par De Jong *et al.* [Jong 2009].

sation de sources semblent proches de résultats de formation de voies intégrés sur la bande $[1\text{kHz}; 12\text{kHz}]$. Ces résultats sont présentés sur la figure C.3 pour trois vitesses de tractage : 2m.s^{-1} , 3m.s^{-1} et $3,5\text{m.s}^{-1}$ avec en abscisse une unité arbitraire telle qu'une division corresponde à un vingtième de la longueur de la ligne d'eau, *i.e.* longueur de la coque immergée non communiquée.

Pour le passage à la vitesse 2m.s^{-1} représenté sur la figure C.3a, on distingue une source localisée à l'arrière au niveau de la poupe autour de l'abscisse 0 et une source localisée au niveau de l'étrave au niveau de l'abscisse 16. Pour le passage à la vitesse 3m.s^{-1} représenté sur la figure C.3b, deux sources de même niveau sont localisées au niveau de la proue aux abscisses 12 et 19 et une source est localisée au niveau de la poupe à l'abscisse -2 avec une amplitude 2 dB supérieure. Pour le passage à la vitesse $3,5\text{m.s}^{-1}$ représenté sur la figure C.3c, une source vers la proue est localisée à l'abscisse 18 et une source vers la poupe de niveau 2dB supérieur est localisée à l'abscisse -4.

D'après la figure C.3, la source acoustique localisée au niveau de la poupe sur les trois figures est la plus énergétique et correspond sans doute à la vague de poupe. Les sources situées au niveau de la proue correspondent aux brisures des vagues d'étraves.

Ces résultats qui sont représentés de façon large bande, car intégrés sur toute la bande de fréquences disponibles, fournissent une première indication sur la localisation des principales sources acoustiques. Cependant, des études plus approfondies restent à mener pour analyser ces sources en bande fine et estimer leur contribution à la signature globale du navire. De plus, le bassin d'essais utilisé est un environnement confiné, il est possible que le confinement perturbe les performances de localisation de sources. Cela peut expliquer

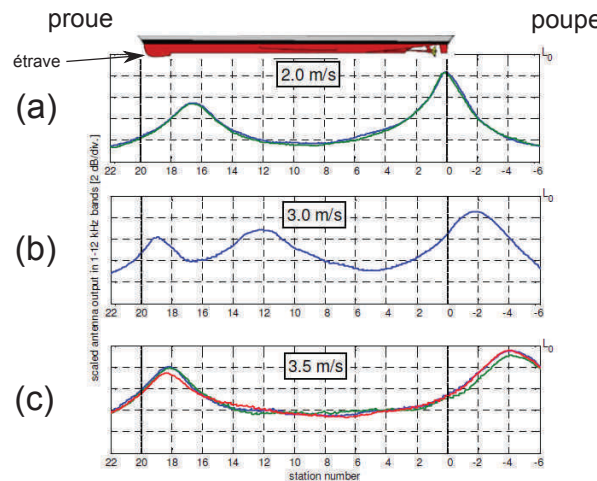


FIGURE C.3 – Résultats de localisation de sources de bruit de passage d’une maquette aux vitesses 2 m.s^{-1} (a), 3 m.s^{-1} (b) et $3,5\text{ m.s}^{-1}$ (c). Cette figure est extraite de l’article de De Jong *et al.* [Jong 2009]. Les graphes avec plusieurs courbes correspondent aux tests de répétabilité. L’échelle en abscisse est une division correspond à $1/20^{\text{ème}}$ de la longueur de la maquette et l’échelle en ordonnée est 2 dB/div .

le choix d’une représentation large bande. En effet, une représentation large bande, qui est une somme des résultats en bande fine, permet de lisser l’effet du bruit sur la bande des fréquences utiles.

C.1.4 Comparaison des résultats de localisation avec les phénomènes hydrodynamiques en jeu

Afin d’étayer les résultats, notamment l’apparition d’une source à l’abscisse 12 à 3 m.s^{-1} avant la proue (fig. C.3b), des photos de la proue de la maquette vue de côté sont présentées sur la Figure C.4. En comparant ces photos de la vague d’étrave avec les résultats de localisation de sources de la figure C.3, il peut être conclu que les sources acoustiques de la vague d’étrave qui interviennent à différentes localisations le long du navire correspondent à la localisation de la brisure de la vague d’étrave. En effet :

- à la vitesse 2 m.s^{-1} , la vague d’étrave se brise à son deuxième rebond (fig. C.4a), cela correspond à la localisation de la source à l’abscisse 16 (fig. C.3a)
- à la vitesse 3 m.s^{-1} , la vague d’étrave se brise dès son entrée dans l’eau (fig. C.4b) et son deuxième rebond crée également des bulles qui éclatent, cela correspond aux localisations des sources à l’abscisse 12 et 19 (fig. C.3b)
- à la vitesse $3,5\text{ m.s}^{-1}$, la vague d’étrave se brise dès son entrée dans l’eau (fig. C.4c), cela correspond à la localisation de la source à l’abscisse 18 (fig. C.3c)

La comparaison des résultats de localisation de sources et des données visuelles permettent d’interpréter physiquement les sources localisées. La brisure de la vague d’étrave est donc la source acoustique qui est localisée au niveau de la proue.

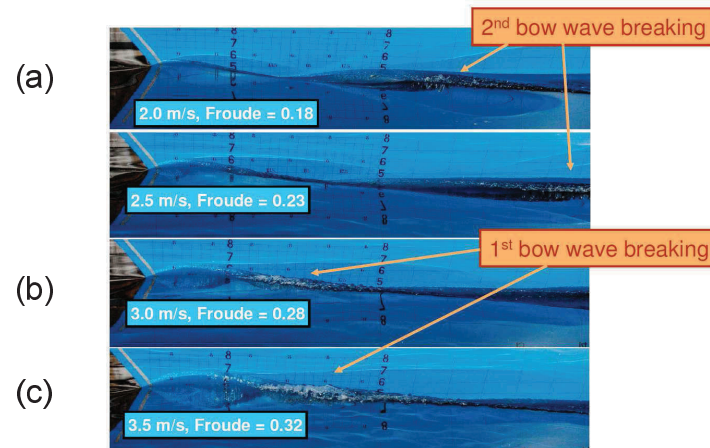


FIGURE C.4 – Photos de la proue vue de côté lors des tirs aux vitesses $2m.s^{-1}$ (a), $3m.s^{-1}$ (b) et $3,5m.s^{-1}$ (c). Visualisation de la localisation de la brisure de la vague d'étrave en fonction du nombre de Froude. Extrait de l'article de De Jong *et al.* [Jong 2009]

C.1.5 Lien avec le projet ARMADA

La campagne de mesures au lac de Castillon propose donc des objectifs similaires au projet NSWCCD-TNO-MARIN précédemment cité, à savoir la localisation des sources acoustiques de bruit de passage de maquette de frégate tractée avec des conditions d'expérimentation plus favorables. Les spécificités du projet ARMADA sont les suivantes :

- des représentations de localisation de sources en bande fine et l'estimation des contributions de sources permettront d'apporter des informations sur le contenu de la signature acoustique au sein de la bande fréquentielle d'intérêt $[500Hz; 1500Hz]$, ce qui n'est pas présenté par De Jong *et al.*.
- l'antenne hydrophonique est plus éloignée de la maquette de navire de surface que dans l'article de De Jong [Jong 2009] ce qui permet de s'affranchir d'éventuel problème de bruit propre des hydrophones induit par le sillage du navire au passage. Dans le bassin d'essais des carènes de MARIN, l'antenne était à une distance de mesure de $\sqrt{2^2 + 0.7^2} = 2,12$ mètres de la maquette alors qu'au lac de Castillon, la distance de mesure théorique est de $\sqrt{10^2 + 2.50^2} = 10,3$ mètres de la maquette AMANDA.
- les tirs de maquette au lac de Castillon ont été réalisés à des vitesses consigne de $2m.s^{-1}$, $3,5m.s^{-1}$ et $5m.s^{-1}$
- les deux rives du lac sont séparées de $630m$ et la profondeur du lac au CPA est de $70m$, ce qui est un milieu moins confiné que le bassin d'essais des carènes de la société MARIN
- la maquette AMANDA possède une longueur de carène d'environ $21,5$ mètres

C.2 Étude acoustique du passage de la maquette AMANDA au lac de Castillon

Dans cette section, nous proposons d'étudier une expérimentation similaire à celle de De Jong *et al.* de bruit de passage de maquette de frégate. Des tirs de maquette à trois vitesses consignes de tractage ont été réalisés : $2m.s^{-1}$, $3,5m.s^{-1}$ et $5m.s^{-1}$. Tout d'abord, le rapport signal sur bruit des mesures de bruit de passage de la maquette AMANDA est analysé pour les trois vitesses de tractage étudiées. Puis, les résultats de localisation de sources sont estimés autour de la maquette AMANDA lors de son passage aux vitesses $3,5m.s^{-1}$ et $5m.s^{-1}$. Nous montrerons que le RSB de la mesure acoustique avec une vitesse de tractage de $2m.s^{-1}$ est négatif et que les résultats de localisation de sources ne peuvent donc être interprétés.

C.2.1 Rapport Signal Sur Bruit

Le bruit de fond de ces expérimentations en eau est défini comme étant le bruit ambiant du lac de Castillon sans excitation mécanique et sans fonctionnement du système de tractage. En effet, dans cette section, nous considérons que les sources d'intérêt sont maintenant toutes les sources acoustiques générées par le passage de la maquette AMANDA.

Afin d'évaluer le RSB de la mesure, les autospectres du signal mesuré par l'hydrophone H_5 de l'antenne lors du passage de la maquette est calculé sur un intervalle temporel correspondant à la portion de trajectoire choisi dans la stratégie d'analyse présentée dans le paragraphe 3.3.3.1. Ces autospectres sont superposés à l'autospectre du bruit ambiant du lac (estimé sur 10 secondes) mesuré par ce même hydrophone sur la Figure C.5. La superposition de ces autospectres permet d'avoir une idée du RSB mais ne permet pas d'estimer le RSB car l'autospectre du signal mesuré lors du passage de la maquette correspond en fait à la mesure du signal d'intérêt et du bruit de fond.

On rappelle que la bande passante de l'antenne hydrophonique est $[375Hz; 1500Hz]$. Pour la vitesse consigne de $2m.s^{-1}$, le RSB est négatif sur toute la bande $[500Hz; 2000Hz]$ car la différence de niveaux entre l'autospectre du bruit de la maquette avec le bruit du lac (fig. C.5, en vert) et l'autospectre du bruit du lac (fig. C.5, en rouge) est inférieure à 3 dB. Le RSB étant négatif pour cette vitesse de tractage, les résultats de localisation de sources et de contribution de sources ne seront donc pas présentés car leur interprétation est discutable. Pour les vitesses consignes de $3,5m.s^{-1}$ et $5m.s^{-1}$, le RSB est d'au moins 10 dB sur $[500Hz; 2000Hz]$.

C.2.2 Localisation des sources acoustiques associées au mouvement du navire

La localisation des sources est maintenant estimée par Beamforming-MS par bloc et par déconvolution avec la méthode SDM sur une grille de calcul de 40 mètres de long centrée sur le pot "Pot Réf." pour localiser les sources autour du navire. Ces résultats sont calculés

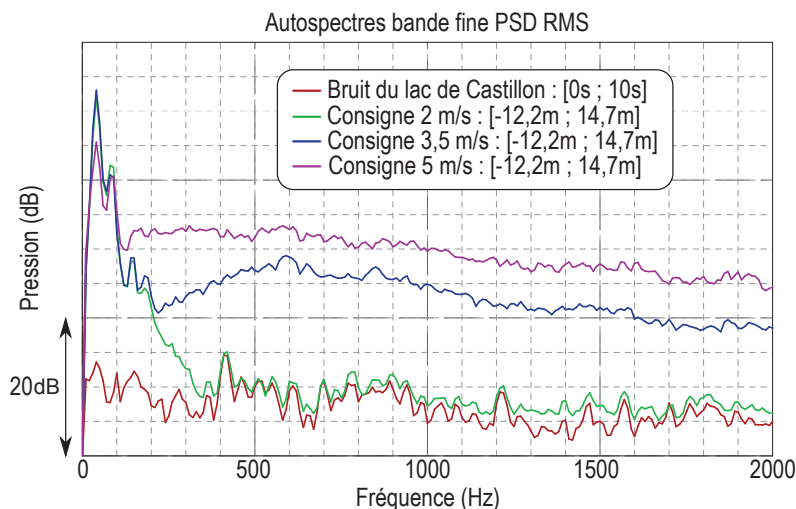


FIGURE C.5 – Autospectres en bande fine de la pression acoustique mesurée par l'hydrophone H_5 lors d'un passage de maquette sans excitation mécanique allumée pour une consigne de vitesse de tractage de 2 m.s^{-1} en vert, de $3,5\text{ m.s}^{-1}$ en bleu et de 5 m.s^{-1} en violet. Le bruit du lac de Castillon sans le système de tractage est représenté en rouge. La dynamique d'affichage est de 20dB par division.

en utilisant les paramètres d'analyse exprimés dans le paragraphe 3.3.3.1 avec une grille de calcul de 40 mètres au lieu de 30 mètres. Les résultats de localisation qui suivent sont représentés dans le plan distance-fréquence $[-20\text{m}; +20\text{m}] \times [500\text{Hz}; 2000\text{Hz}]$. Un schéma de la maquette AMANDA est représenté à l'échelle des abscisses pour faciliter la lecture des résultats de localisation.

Vitesse consigne de $3,5\text{ m.s}^{-1}$

La figure C.6a représente le résultat du Beamforming-MS par bloc et la figure C.6b représente le résultat obtenu après déconvolution par la méthode SDM. L'étrave et la poupe sont repérées par des tirets violets.

Au vu de la figure C.6a, on constate la localisation d'une source large bande au niveau de la poupe à l'abscisse $x = -12\text{m}$ et d'une source large bande autour de l'abscisse $x = +6\text{m}$ en aval de l'étrave qui est théoriquement localisée à l'abscisse $x = +9,5\text{m}$ (fig. 3.22). La déconvolution par la méthode SDM permet d'affiner la localisation des sources, la figure C.6b montre bien une source localisée au niveau de la poupe et une source en aval de l'étrave à une position autour de $x = +6\text{m}$ dans le référentiel de la maquette AMANDA. La source localisée au niveau de la poupe a une amplitude environ 10 dB supérieure à celle de la source au niveau de l'étrave.

Afin d'apprécier visuellement les phénomènes physiques en jeu, une photo du passage de la maquette au passage au niveau du CPA pour cette mesure est représentée sur la figure

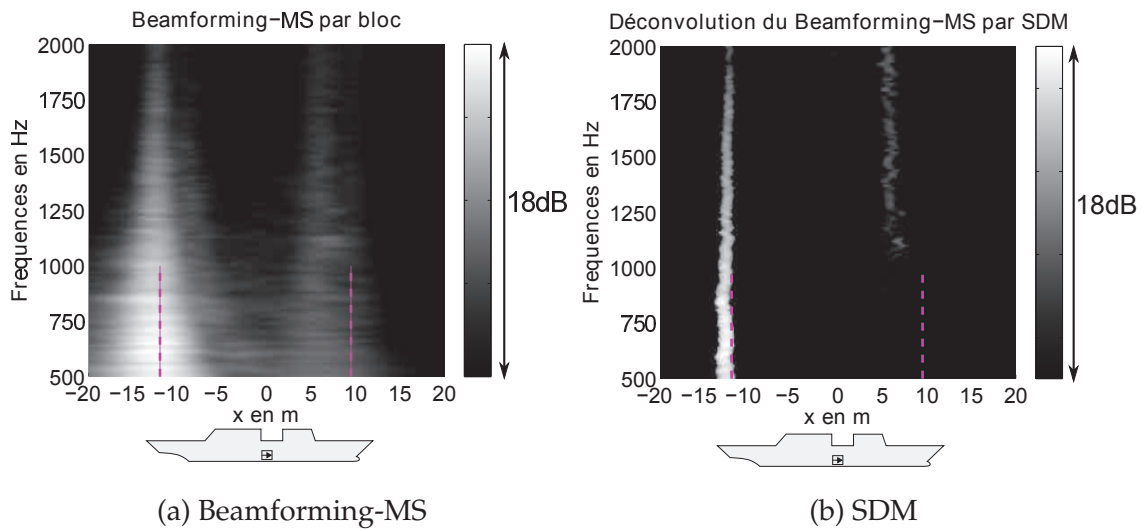


FIGURE C.6 – Tir de maquette à la vitesse consigne $3,5m.s^{-1}$ sans excitation mécanique : Localisation de sources par Beamforming-MS (a) et SDM (b). L'étrave et la poupe sont repérées par des tirets violets. La dynamique d'affichage est de 18 dB.

C.7. D'après cette photo, on constate l'existence d'une vague d'étrave et d'une vague de poupe ainsi que leur sillage.

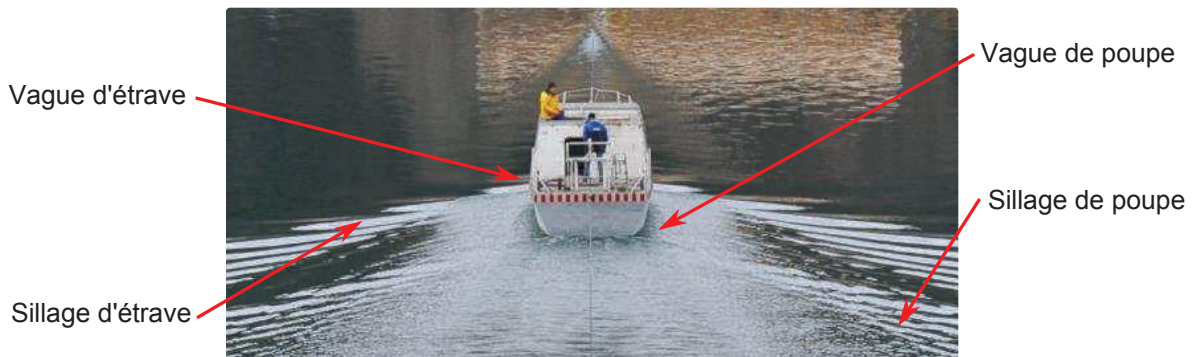


FIGURE C.7 – Photo du passage de la maquette au niveau du CPA pour la configuration avec une vitesse consigne de $3,5m.s^{-1}$.

Vitesse consigne de $5m.s^{-1}$

La figure C.8a représente le résultat du Beamforming-MS par bloc et la figure C.8b représente le résultat obtenu après déconvolution par la méthode SDM.

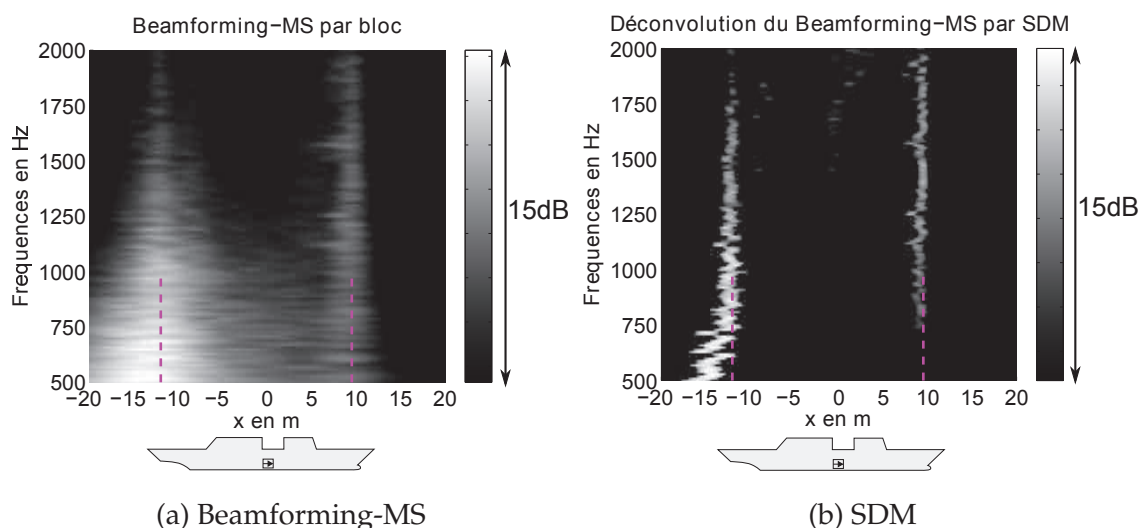


FIGURE C.8 – Tir de maquette à la vitesse consigne $5m.s^{-1}$ sans excitation mécanique : Localisation de sources par Beamforming-MS (a) et SDM (b). L'étrave et la poupe sont repérées par des tirets violets. La dynamique d'affichage est de 15 dB.

Au vu de la figure C.8a, on constate la localisation d'une source large bande au niveau de la poupe autour de l'abscisse $x = -12m$ et d'une source large bande au niveau de l'étrave à l'abscisse $x = +9,5m$. La déconvolution par la méthode SDM permet d'affiner la localisation des sources, la figure C.8b montre bien une source au niveau de l'étrave mais la source localisée au niveau de la poupe semble être directive puisque sa localisation varie avec la fréquence entre les abscisses $x = -15m$ et $x = -10m$. La source localisée au niveau de la poupe a une amplitude environ 10 dB supérieure à celle de la source au niveau de l'étrave.



FIGURE C.9 – Photo du passage de la maquette au niveau du CPA pour la configuration avec une vitesse consigne de $5m.s^{-1}$.

Afin d'apprécier visuellement les phénomènes physiques en jeu, une photo du passage de la maquette au passage au niveau du CPA pour cette mesure est représentée sur la figure C.9. D'après cette photo, on constate l'existence d'une vague d'étrave et d'une vague de poupe ainsi que leur sillage. La couleur blanche au niveau des vagues d'étrave et de poupe témoigne de nombreuses bulles qui constituent ainsi un milieu diphasique qui peut affecter la directivité du rayonnement acoustique de la brisure de la vague de poupe, observée sur la figure C.8.

Interprétation physique des sources localisées

À la vitesse de $5m.s^{-1}$, au vu de la photo de la figure C.9, la vague d'étrave et la vague de poupe qui créent des bulles se brisent dès leur entrée dans l'eau. Cela correspond bien au fait que les sources soient localisées aux abscisses de l'étrave à l'abscisse $x = +9,5m$ et de la poupe autour de l'abscisse $x = -12m$ sur la figure C.8.

À la vitesse de $3,5m.s^{-1}$, la source localisée au niveau de la poupe à l'abscisse $x = -12m$ correspond donc à la source acoustique associée à la brisure de la vague de poupe dans son entrée dans l'eau. La source acoustique localisée en aval de l'étrave aux environs de l'abscisse $x = 6m$ correspond à la brisure de la vague d'étrave après rebond sur la surface de l'eau. D'après les figures C.3 et C.4 pour la configuration de De Jong *et al.* [Jong 2009] à la vitesse $3m.s^{-1}$, la vague d'étrave de leur maquette se brise en son deuxième rebond qui intervient à huit vingtièmes de la longueur de la maquette en aval de son étrave (fig. C.3), ce qui correspond à une distance d'environ 4,5 mètres en aval de son étrave. Sur la figure C.6, la source localisée en aval de l'étrave de la maquette AMANDA étant localisée autour de l'abscisse $x = 6m$ soit 3,5 mètres en aval de l'étrave, on en déduit que c'est également au deuxième rebond que la vague d'étrave se brise dans notre expérimentation.

Brisure de la vague d'étrave

D'après les résultats de localisation de la figure C.6, la vague d'étrave se brise lors de son deuxième rebond à la vitesse consigne de $3,5m.s^{-1}$. D'après les résultats de localisation de la figure C.8, la vague d'étrave se brise lors de sa première entrée dans l'eau à la vitesse consigne de $5m.s^{-1}$.

Des observations similaires ont été réalisées par De Jong *et al.* mais pour une maquette de navire de surface moins longue en utilisant des photographies de la proue (fig. C.4). La maquette AMANDA possède la même géométrie avec un bulbe d'étrave, afin de corroborer les observations de De Jong *et al.*, nous proposons de calculer le nombre de Froude relatif à la configuration expérimentale du lac de Castillon. Les nombres de Froudes sont calculés à partir de l'équation (3.3), pour une longueur de carène de la maquette AMANDA $L_{nav} = 21,5m$:

- $F_L = 0,241$ pour une vitesse consigne de $3,5m.s^{-1}$
- $F_L = 0,344$ pour une vitesse consigne de $2m.s^{-1}$

D'après la figure C.4d et C.4b, la brisure de la vague d'étrave intervient dès son entrée dans l'eau pour des nombres de Froude supérieurs à 0,28 et au deuxième rebond pour des

nombres de Froude inférieurs à 0,23. Ces valeurs de nombre de Froude confirment le fait que pour les vitesses consigne inférieures à $3,5\text{m.s}^{-1}$, i.e. $F_L \leq 0,241$, la vague d'étrave se brise au deuxième rebond.

C.3 Conclusions et perspectives

Conclusions

Tout d'abord, les expérimentations de bruit de passage réalisées par De Jong *et al.* [Jong 2009] ont été réalisées dans un bassin d'essais des carènes. Ce moyen d'essais est le plus courant chez les industriels du naval mais n'est pas adapté aux études de bruit de passage de maquette de navire du fait de la réverbération importante. Le bassin des carènes utilisé par De Jong *et al.* est traité acoustiquement mais l'auteur affirme quand même que des effets de confinement peuvent perturber les mesures acoustiques. Le site d'essais de la DGA Techniques navales au lac de Castillon est donc un moyen d'essais permettant de s'affranchir du problème de confinement et d'expérimenter dans un milieu semi-anéchoïque dont la modélisation de la propagation acoustique est simple. Ce moyen d'essais est donc recommandé pour toutes les mesures de bruit hydrodynamique de maquettes de navires de surface qui nécessitent un bon rapport signal sur bruit.

Deux configurations de passage de la maquette AMANDA aux consignes de vitesse de tractage $3,5\text{m.s}^{-1}$ et 5m.s^{-1} ont été analysées avec les méthodes de localisation proposées au cours de cette thèse.

À la consigne $3,5\text{m.s}^{-1}$, deux sources ont été localisées en aval de l'étrave et au niveau de la poupe après déconvolution du Beamforming-MS par SDM. À la consigne 5m.s^{-1} , deux sources ont été localisées au niveau de l'étrave et au niveau de la poupe après déconvolution du Beamforming-MS par SDM. En calculant les nombres de Froude de ces configurations et en les comparant aux résultats de De Jong *et al.* [Jong 2009], nous avons pu constater les mêmes observations et que la brisure de la vague d'étrave rayonnait à différentes localisations selon la vitesse du navire.

Les contributions énergétiques relatives des différentes sources ont également été étudiées mais ne sont pas présentées dans ce manuscrit pour des raisons de confidentialité.

Perspectives

Plusieurs perspectives émanent de cette étude du bruit hydrodynamique de la maquette de navire de surface.

Les localisations des sources estimées dans cette annexe ne concernent que les sources acoustiques générées autour du navire de surface. Il serait intéressant d'évaluer également la localisation des sources acoustiques associées au sillage de la maquette de navire relativement aux sources déjà étudiées. En effet, la brisure des bulles transportées par le sillage du navire est une source qui peut être très étendue à l'arrière du navire et est une importante source d'indiscrétion acoustique.

De plus, des configurations expérimentales supplémentaires doivent être réalisées notamment avec différents types de navires afin d'optimiser les géométries d'étrave et de carène par des comparaisons de résultats de localisation-contribution relatifs.

Enfin, une autre perspective de recherche intéressante est la corrélation des résultats de localisation-contribution avec les modèles numériques de prédiction de bruit rayonné par un navire. En effet, du fait de la complexité de la structure d'un navire, la prédiction du bruit rayonné n'est en pratique pas égale au bruit rayonné réel. Il serait alors intéressant d'évaluer les performances de prédiction numérique par une méthode expérimentale comme celle proposée dans cette thèse.

Bibliographie

- [Abramowitz 1964] M. Abramowitz et I.A. Stegun. Handbook of mathematical functions. 55. Dover Publications, 1964.
- [André 2011] M. André, M. Van Der Schaar, S. Zaugg, L. Houégnigan, A.M. Sánchez et J.V. Castell. *Listening to the deep : live monitoring of ocean noise and cetacean acoustic signals*. Marine pollution bulletin, vol. 63, no. 1, pages 18–26, 2011.
- [Andrew 2001] R.K. Andrew, D.M. Farmer et R.L. Kirilin. *Broadband parametric imaging of breaking ocean waves*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 110, no. 1, pages 150–162, 2001.
- [Antonacci 2006] F. Antonacci, D. Riva, D. Saiu, A. Sarti, M. Tagliasacchi et S. Tubaro. *Tracking multiple acoustic sources using particle filtering*. In Eur. Signal Processing Conf.(EUSIPCO), 2006.
- [Antoni 2012a] J. Antoni. *Full-field reconstruction from scanned measurements without references : the latent variable approach*. Acoustics 2012 Nantes, 2012.
- [Antoni 2012b] J. Antoni et D. Hanson. *Detection of Surface Ships From Interception of Cyclostationary Signature With the Cyclic Modulation Coherence*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 37, no. 3, pages 478–493, 2012.
- [Arveson 2000] P.T. Arveson et D.J. Vendittis. *Radiated noise characteristics of a modern cargo ship*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 107, no. 1, pages 118–129, 2000.
- [ASA 2009] ASA. *S12.64-2009 Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1 :General requirements*, Acoustical Society of America, 2009.
- [Aucejo 2010] M. Aucejo. *Vibro-acoustique des structures immergées sous écoulement turbulent*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2010.
- [Audoly 2014] C. Audoly, C. Rousset et T. Leissing. *AQUO Project—Modelling of ships as noise source for use in an underwater noise footprint assessment tool*. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, volume 249, pages 862–871. Institute of Noise Control Engineering, 2014.
- [B. 2003] Daniel B. et Georges E. *Level estimation of extended acoustic sources using an array of microphones*. In AIAA/CEAS, 9th Aeroacoustics Conference, 2003.
- [Bahr 2012] C. Bahr et L. Cattafesta. *Wavespace-Based Coherent Deconvolution*. In American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [Ballesteros 2015] J.A. Ballesteros, E. Sarradj, M.D. Fernandez, T. Geyer et M.J. Ballesteros. *Noise source identification with Beamforming in the pass-by of a car*. Applied Acoustics, vol. 93, pages 106–119, 2015.
- [Barabell 1998] A.J. Barabell, J. Capon, D.F. Delong, J.R. Johnson et K.D. Senne. *Performance comparison of superresolution array processing algorithms*. Rapport technique 19980211580, Lincoln laboratory, MIT, 1998.

- [Barker 1976] S.J. Barker. *Measurements of hydrodynamic noise from submerged hydrofoils*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 59, no. 5, pages 1095–1103, 1976.
- [Barsikow 1987] B. Barsikow, W.F. King et E. Pfizenmaier. *Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones*. Journal of Sound and Vibration, vol. 118, no. 1, pages 99–122, 1987.
- [Bearman 1965] P.W. Bearman. *Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates*. J. Fluid Mech, vol. 21, no. part 2, pages 241–256, 1965.
- [Blake 1984] W.K. Blake. *Aero-Hydroacoustics for ship*. Rapport technique, David Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1984.
- [Blake 1986] W.K. Blake. *Mechanics of flow-induced sound and vibration*. Academic Press, 1986.
- [Bonnet 1995] M. Bonnet. *Équations intégrales et éléments de frontiere*. CNRS Editions/Eyrolles, 1995.
- [Boyd 2004] S.P. Boyd et L. Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [Breeding 1996] J.E. Breeding, L.A. Pflug, M. Bradley, M. Hebert et M. Wooten. *RANDI 3.1 : Research Ambient Noise DIrectionality model - User's Guide*. Rapport technique, Naval Research Laboratory, 1996.
- [Brennen 1995] C.E. Brennen. *Cavitation and bubble dynamics*. Oxford University Press, 1995.
- [Breslin 1996] J.P. Breslin et P. Andersen. *Hydrodynamics of ship propellers*, volume 3. Cambridge University Press, 1996.
- [Brooks 1987] T.F. Brooks, M.A. Marcolini et D.S. Pope. *A directional array approach for the measurement of rotor noise source distributions with controlled spatial resolution*. Journal of Sound and Vibration, vol. 112, no. 1, pages 192–197, 1987.
- [Brooks 2006a] T.F. Brooks et W.M. Humphreys. *A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays*. Journal of Sound and Vibration, vol. 294, no. 4, pages 856–879, 2006.
- [Brooks 2006b] T.F. Brooks et W.M. Humphreys Jr. *Extension of DAMAS Phased Array Processing for Spatial Coherence Determination(DAMAS-C)*. In 12 th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2006.
- [Bruhl 2000] S. Bruhl et A. Roder. *Acoustic noise source modelling based on microphone array measurements*. Journal of sound and vibration, vol. 231, no. 3, pages 611–617, 2000.
- [Bruhl 2005] S. Bruhl. *Theory Manual - Array Kernels*. Rapport technique, EADS, 2005.
- [Brusniak 2006] L. Brusniak, J. Underbrink et R. Stoker. *Acoustic Imaging of Aircraft Noise Sources Using Large Aperture Phased Arrays*. In 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference), Cambridge, Massachusetts, May 8-10, 2006, 2006.
- [Caillé 2007] F. Caillé. *Sillages de bulles des navires de surface*. PhD thesis, Université de Provence, 2007.

- [Camargo 2010] H.E. Camargo. *A frequency domain beamforming method to locate sound sources*. PhD thesis, Virginia Tech, 2010.
- [Capon 1969] J. Capon. *High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis*. Proceedings of the IEEE, vol. 57, no. 8, pages 1408–1418, 1969.
- [Caresta 2009] M. Caresta. *Structural and acoustic responses of a submerged vessel*. PhD thesis, University of New South Wales, 2009.
- [Chu 2013] N. Chu, A. Mohammad-Djafari, J. Picheral et N. Gac. *An efficient variational Bayesian inference approach via Student's-t priors for acoustic imaging in colored noises*. In Proceedings of Meetings on Acoustics, volume 19, page 055031. Acoustical Society of America, 2013.
- [Clay 1977] C.S. Clay et H. Medwin. *Acoustical oceanography : principles and applications*, volume 15. John Wiley & Sons, 1977.
- [Collins 1994] M.D. Collins et W.A. Kuperman. *Inverse problems in ocean acoustics*. Inverse Problems, vol. 10, no. 5, page 1023, 1994.
- [Curle 1955] N. Curle. *The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 231, no. 1187, pages 505–514, 1955.
- [d'Assumpcao 1970] H.A. d'Assumpcao. *Theoretical assessment of DEMON performance*. Rapport technique, DTIC Document, 1970.
- [De Jong 2005] C.A.F. De Jong, J. Bosschers, H. Hasenpflug et T.M. Farabee. *Surface ship underwater radiated flow noise*. Proceeding of Underwater Defense Technology, Amsterdam, 2005.
- [Deane 1997] G.B. Deane. *Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 102, no. 5, pages 2671–2689, 1997.
- [Deane 2010] G.B. Deane et M.D. Stokes. *Model calculations of the underwater noise of breaking waves and comparison with experiment*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 127, no. 6, pages 3394–3410, 2010.
- [Directive 2008] Strategy Framework Directive. *Marine Framework Strategy Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council*. Journal of Council Decision, 2008.
- [Doisy 2010] Y. Doisy, L. Deruaz et R. Been. *Interference suppression of subarray adaptive beamforming in presence of sensor dispersions*. Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 58, no. 8, pages 4195–4212, 2010.
- [Duncan 2011] A. Duncan et D. McMahon. *Near field acoustic imaging of a submarine with its own towed array*. In Defense applications of signal processing, 2011.
- [Ehrenfried 2007] K. Ehrenfried et L. Koop. *Comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources*. AIAA journal, vol. 45, no. 7, pages 1584–1595, 2007.
- [Elias 1983] G. Elias et C. Malarmey. *Utilisation d'antennes focalisées pour la localisation de sources acoustiques*. Revue d'Acoustique, numéro hors série, 11 ème Congrès International d'Acoustique, Paris, vol. 6, pages 163–166, 1983.

- [Eriksson 1994] A. Eriksson, P. Stoica et T. Soderstrom. *On-line subspace algorithms for tracking moving sources*. Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 42, no. 9, pages 2319–2330, 1994.
- [Espérandieu 1990] J.S. Espérandieu. *Prediction of horizontal ambient shipping noise directionality with an analytical model : ANATRA*. In Undersea Defence Technology Conference, 1990.
- [Ferréol 2005] A. Ferréol. *Radio-goniométrie : modélisation, algorithmes, performances*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2005.
- [Firenze 2015] E. Firenze et F. Valdenazzi. *A method to predict underwater noise from cavitating propellers*. In IEEE Oceanic Engineering, 2015.
- [Fleury 2011] V. Fleury et J. Bulté. *Extension of deconvolution algorithms for the mapping of moving acoustic sources*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 129, page 1417, 2011.
- [Folegot 2012] T. Folegot, C. Gervaise, Y. Stéphan, D. Clorennec et B. Kinda. *Now casting Anthropogenic Ocean Noise in High Pressure Areas*. In Acoustics 2012, pages n–c, 2012.
- [Fournier 1990] G. Fournier. *Aéroacoustique et hydroacoustique*. Techniques de l'ingénieur, vol. 1, no. A430, pages 1–40, 1990.
- [Fournier 2009] G. Fournier. *Hydroacoustique et bruit des navires*. Techniques de l'ingénieur. Bruit et vibrations, vol. 1, no. BR2030, pages 1–13, 2009.
- [Gershman 2003] A.B. Gershman, Z.-Q. Luo, S. Shahbazpanahi et S.A. Vorobyov. *Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization*. In Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on, volume 2, pages 1353–1357. IEEE, 2003.
- [Gervaise 2008] C. Gervaise. *Cours d'acoustique sous-marine*. Rapport technique, ENSIETA, 2008.
- [Gervaise 2012] C. Gervaise, Y. Simard, N. Roy, B. Kinda et N. Ménard. *Shipping noise in whale habitat : Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay-St. Lawrence Marine Park hub*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 132, no. 1, pages 76–89, Septembre 2012. WOS.
- [Goldstein 1976] M.E. Goldstein. *Aeroacoustics*. New York, McGraw-Hill International Book Co., 1976. 305 p., vol. 1, 1976.
- [Grant 2004] M.C. Grant. *Disciplined convex programming*. PhD thesis, Stanford University, California, 2004.
- [Guérin 2006] S. Guérin, C. Weckmüller et U. Michel. *Beamforming and deconvolution for aerodynamic sound sources in motion*. In 1st Berlin Beamforming Conference, pages 21–22, 2006.
- [Gutin 1948] L. Gutin. *On the sound field of a rotating propeller*. Rapport technique, NACA TM, 1948.
- [Hadamard 1902] J. Hadamard. *Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique*. Princeton university bulletin, vol. 13, no. 49-52, page 28, 1902.

- [Hassab 1981] J.C. Hassab, B.W. Guimond et S.C. Nardone. *Estimation of location and motion parameters of a moving source observed from a linear array*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 70, no. 4, pages 1054–1061, 1981.
- [Hawker 1979] K.E. Hawker. *A normal mode theory of acoustic Doppler effects in the oceanic waveguide*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, page 675, 1979.
- [Hay 1981] J. Hay. *Improvement of the imaging of moving acoustic sources by the knowledge of their motion*. In Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'81., volume 6, pages 1247–1252. IEEE, 1981.
- [Hinze 1959] J. Hinze. *Turbulence*. McGraw Hill, 1959.
- [Hobbs 1992] S.L. Hobbs. *Asymptotic statistics for location estimates of acoustic signals*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 91, no. 3, pages 1538–1544, 1992.
- [Hogbom 1974] J.A. Hogbom. *Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines*. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, vol. 15, pages 417–426, Juin 1974. origine : CLEAN.
- [Hu 2011] B. Hu, D. Yang, S. Shi et Y. Sun. *Underwater moving noise source identification based on hybrid near-field acoustical holography*. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, vol. 54, no. 9, pages 1570–1578, 2011.
- [Hu 2012] H.H. Hu et D.J. Shang. *A fast method for the sound radiation of baffled rectangular plate with fluid loading*. In Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on, pages 1318–1322. IEEE, 2012.
- [Ikeda 2012] T. Ikeda, T. Atobe et S. Takagi. *Direct simulations of trailing-edge noise generation from two-dimensional airfoils at low Reynolds numbers*. Journal of Sound and Vibration, vol. 331, no. 3, pages 556 – 574, 2012.
- [IRIG 1987] IRIG. *Inter-Range Instrumentation Group - Standard 205-87, Parallel binary coded decimal time code formats*, 1987, 1987.
- [ISO 1990] ISO. *ISO 9645 :1990 - Measurement of noise emitted by two-wheeled mopeds in motion*, 1990.
- [ISO 2004] ISO. *ISO 10052 :2004 - Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound – Survey method*, 2004.
- [ISO 2007] ISO. *ISO 5130 :2007 - Measurements of sound pressure level emitted by stationary road vehicles*, 2007.
- [ISO 2008] ISO. *ISO 14509-1 :2008 - Small craft – Airborne sound emitted by powered recreational craft – Part 1 : Pass-by measurement procedures*, 2008.
- [ISO 2009a] ISO. *ISO 14509-3 :2009 - Small craft – Airborne sound emitted by powered recreational craft – Part 3 : Sound assessment using calculation and measurement procedures*, 2009.
- [ISO 2009b] ISO. *ISO 20906 :2009 - Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports*, 2009.
- [ISO 2009c] ISO. *ISO 362-2 :2009 - Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Part2 : L category*, 2009.

- [ISO 2012] ISO. *ISO/PAS 17208-1 :2012 - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1 : General requirements for measurements in deep water*, 2012.
- [ISO 2013] ISO. *ISO 3095 :2013 - Railway applications - Measurement of noise emitted by rail-bound vehicles*, 2013.
- [ISO 2014] ISO. *ISO/DIS 16554.3 :2014 - Ships and marine technology - Protecting marine ecosystem from underwater radiated noise - Measurement and report of underwater sound radiated from merchant ships*, 2014.
- [ISO 2015] ISO. *ISO 362-1 :2015 - Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Part1 : M and N categories*, 2015.
- [Jacyna 1976] G.M. Jacyna, M.J. Jacobson et J.G. Clark. *General treatment of source motion on the total acoustic field with application to an isospeed channel*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 60, page 815, 1976.
- [Jeans 1992] R. Jeans et I. C. Mathews. *The wave superposition method as a robust technique for computing acoustic fields*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. Jeans1992, no. 2, pages 1156–1166, 1992.
- [Jensen 2011] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter et H. Schmidt. *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [Jong 2009] C.A.F. De Jong, J. Bosschers et H. Hasenpflug. *Model scale measurements of surface ship radiated flow noise*. In NAG-DAGA International Conference on Acoustics, 2009.
- [Josso 2010] N. Josso. *Caractérisation des milieux sous marins en utilisant des sources mobiles d'opportunité*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [Kook 2000] H. Kook, G.B. Moebs, P. Davies et J.S. Bolton. *An efficient procedure for visualizing the sound field radiated by vehicles during standardized passby tests*. Journal of Sound and Vibration, vol. 233, no. 1, pages 137–156, 2000.
- [Koopmann 1989] G.H. Koopmann, L. Song et J.B. Fahnlne. *A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 86, no. 6, pages 2433–2438, 1989.
- [Krim 1996] H. Krim et M. Viberg. *Two Decades of Array Signal Processing Research : The Parametric Approach*. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 13, pages 67–94, 1996.
- [Kropp 1995] W. Kropp et P.U. Svensson. *Application of the time domain formulation of the method of equivalent sources to radiation and scattering problems*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 81, no. 6, pages 528–543, 1995.
- [Kuiper 1981] G. Kuiper. *Cavitation inception on ship propeller models*. PhD thesis, Delft University of Technology, 1981.
- [Lafeber 2015] F.-H. Lafeber, J. Bosschers et E. van Wijngaarden. *Computational and experimental prediction of propeller cavitation noise*. In IEEE Oceanic Engineering, 2015.
- [Lamarre 1994] E. Lamarre et W.K. Melville. *Void-fraction measurements and sound-speed fields in bubble plumes generated by breaking waves*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 95, no. 3, pages 1317–1328, 1994.

- [Lange 2010] K. Lange. Sound source reconstruction with covariance matrix fitting. Master's thesis, Technical University of Denmark, 2010.
- [Laulagnet 1989] B. Laulagnet. *Rayonnement acoustique des coques cylindriques, finies raidies, revêtues d'un matériau de masquage*. PhD thesis, INSA Lyon, 1989.
- [Laulagnet 1998] B. Laulagnet. *Sound radiation by a simply supported unbaffled plate*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 103, page 2451, 1998.
- [Lebret 1997] H. Lebret et S. Boyd. *Antenna array pattern synthesis via convex optimization*. Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 45, no. 3, pages 526–532, Mar 1997.
- [LeCourtois 2012] F. LeCourtois. *Caractérisation des sources acoustiques sur le matériel ferroviaire par méthode d'antennerie*. PhD thesis, LAUM, Université du Maine, 2012.
- [Leissa 1969] A.W. Leissa. *Vibration of plates*. Rapport technique, NASA SP-160, 1969.
- [Lesueur 1988] C. Lesueur. *Rayonnement acoustique des structures : Vibroacoustique, interactions fluide-structure*. Eyrolles, 1988.
- [Li 1991] F. Li et R.J. Vaccaro. *Unified analysis for DOA estimation algorithms in array signal processing*. Signal Processing, vol. 25, no. 2, pages 147–169, 1991.
- [Li 1996] J. Li et P. Stoica. *Efficient Mixed-Spectrum Estimation with Applications to Target Feature Extraction*. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 44, pages 281–295, 1996.
- [Li 2003] J. Li, P. Stoica et Z. Wang. *On robust Capon beamforming and diagonal loading*. In Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on, volume 5, pages V–337–40 vol.5, 2003.
- [Liepmann 1955] H.W. Liepmann. *Extension of the statistical approach to buffeting and gust response of wings of finite span*. Journal of the Aeronautical Sciences, vol. 22, no. 3, pages 197–200, 1955.
- [Lighthill 1952] M.J. Lighthill. *On sound generated aerodynamically : I. General theory*. In Proceedings of the Royal Society of London, volume 211, pages 564–587, 1952.
- [Loewen 1991] M.R. Loewen et W.K. Melville. *A model of the sound generated by breaking waves*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 90, no. 4, pages 2075–2080, 1991.
- [Ludecke 1992] F.G. Ludecke. *De-Dopplerization of underwater acoustic data*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 92, no. 5, pages 2813–2822, 1992.
- [Marcos 1998] S. Marcos. *Les méthodes à haute résolution : traitement d'antenne et analyse spectrale*. Hermes, 1998.
- [Marsal 1993] A. Marsal et S. Marcos. *Influence d'erreurs de modèles sur diverses méthodes d'analyse spatiale*. TS. Traitement du signal, vol. 10, no. 5-6, pages 423–441, 1993.
- [McKenna 2012] M.F. McKenna, D. Ross, S.M. Wiggins et J.A. Hildebrand. *Underwater radiated noise from modern commercial ships*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 131, no. 1, pages 92–103, 2012.
- [Mellet 2006] C. Mellet, F. Létourneaux, F. Poisson et C. Talotte. *High speed train noise emission : Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution*. Journal of sound and vibration, vol. 293, no. 3, pages 535–546, 2006.

- [Moffet 1968] A.T. Moffet. *Minimum-redundancy linear arrays*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 16, no. 2, pages 172–175, 1968.
- [Morse 1968] P.M. Morse et K.U. Ingard. *Theoretical acoustics*. McGraw-Hill, 1968.
- [Mueller 2002] T.J. Mueller. *Aeroacoustic measurements*. Springer Verlag, 2002.
- [Nam 1999] K.-U. Nam et Y.-H. Kim. *Errors due to sensor and position mismatch in planar acoustic holography*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 106, no. 4, pages 1655–1665, 1999.
- [Noblesse 2011] F. Noblesse, G. Delhommeau, C. Yang, H.Y. Kim et P. Queutey. *Analytical bow waves for fine ship bows with rake and flare*. Journal of Ship Research, vol. 55, no. 1, pages 1–18, 2011.
- [Oudompheng 2013] B. Oudompheng, C. Gervaise, L. Lamotte, W.S.B. Ouedraogo, B. Nicolas et J.I. Mars. *Modélisation temporelle des sources acoustiques d'un bâtiment marin ou sous-marin en mouvement dans le champ lointain*. In XXIVème colloque GRETSI (GRETSI 2013), page ID261, 2013.
- [Oudompheng 2015] B. Oudompheng, B. Nicolas et L. Lamotte. *Passive synthetic aperture array to improve noise mapping of a moving ship*. In MTS/IEEE OCEANS Conference, 2015.
- [Ouedraogo 2014] W.S.B. Ouedraogo, B. Nicolas, B. Oudompheng, J.I. Mars et C. Jutten. *A frequency method for blind separation of anechoic mixture*. In 22th EUSIPCO, 2014.
- [Paillasseur 2011] S. Paillasseur, J.-H. Thomas et J.-C. Pascal. *Regularization for improving the deconvolution in real-time near-field acoustic holography*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 129, no. 6, pages 3777–3787, 2011.
- [Paterson 1976] R.W. Paterson et R.K. Amiet. *Acoustic radiation and surface pressure characteristics of an airfoil due to incident turbulence*. Rapport technique, NASA, 1976.
- [Peillot 2012] A. Peillot. *Imagerie acoustique par approximations parcimonieuses des sources*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012.
- [Pereira 2013] A. Pereira. *Acoustic imaging in enclosed spaces*. PhD thesis, Laboratoire de Vibro-acoustique, INSA Lyon, 2013.
- [Pierce 1989] A.D. Pierce. *Acoustics : an introduction to its physical principles and applications*. Acoustical Society of America, 1989.
- [Plesset 1977] M.S. Plesset et A. Prosperetti. *Bubble dynamics and cavitation*. Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 9, no. 1, pages 145–185, 1977.
- [Poisson 1996] F. Poisson. *Localisation et caractérisation de sources acoustiques en mouvement rapide*. PhD thesis, Université du Maine, 1996.
- [Ravetta 2005] P.A. Ravetta. *LORE approach for phased array measurements and noise control of landing gears*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2005.
- [Repetti 2015] A. Repetti, M.Q. Pham, L. Duval, E. Chouzenoux et J.-C. Pesquet. *Euclid in a Taxicab : Sparse Blind Deconvolution with Smoothed Regularization*. IEEE Signal Processing Letters, vol. 22, no. 5, pages 539–543, 2015.
- [Rienstra 2004] Rienstra et Hirschberg. *An introduction to acoustics*. Eindhoven University of Technology, 2004.

- [Roger 2010] M. Roger et S. Moreau. *Extensions and limitations of analytical airfoil broadband noise models*. International Journal of Aeroacoustics, vol. 9, no. 3, pages 273–306, 2010.
- [Ross 1976] D. Ross. *Mechanics of underwater noise*. 1976.
- [Rozenberg 2007] Y. Rozenberg. *Modélisation analytique du bruit aérodynamique à large bande des machines tournantes : utilisation de calculs moyennés de mécanique des fluides*. PhD thesis, LMFA, Ecole Centrale de Lyon, 2007.
- [Salvatore 2009] F. Salvatore, C. Testa et L. Greco. *Coupled hydrodynamics-hydroacoustics BEM modelling of marine propellers operating in a wakefield*. In First international symposium on marine propulsors, 2009.
- [Sears 1938] W.R. Sears. *A systematic presentation of the theory of thin airfoils in non-uniform motion*. PhD thesis, California Institute of Technology, 1938.
- [Sijtsma 2007] P. Sijtsma. *CLEAN based on spatial source coherence*. International journal of aeroacoustics, vol. 6, no. 4, pages 357–374, 2007.
- [Sijtsma 2012] P. Sijtsma. *Acoustic beamforming for the ranking of aircraft noise*. Rapport technique, NLR, 2012.
- [Siller 2010] H. Siller, M. Drescher, G. Saueressig et R. Lange. *Fly-over source localisation on a boeing 747-400*. In Berlin Beamforming Conference. Citeseer, 2010.
- [Skelton 1997] E.A. Skelton et J.H. James. *Theoretical acoustics of underwater structures*. Imperial College Press, 1997.
- [Smith 1970] R.P. Smith. *Constant beamwidth receiving arrays for broad band sonar systems*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 23, no. 1, pages 21–26, 1970.
- [Stanic 2007] S. Stanic, E. Kennedy, B. Brown, D. Medley, R. Goodman et J. Caruthers. *Broad-band acoustic transmission measurements in surface ship wakes*. In IEEE Oceanic Engineering, 2007.
- [Stergiopoulos 1989] S. Stergiopoulos et E.J. Sullivan. *Extended towed array processing by an overlap correlator*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 86, no. 1, pages 158–171, 1989.
- [Stoica 2003] P. Stoica, Z. Wang et J. Li. *Robust Capon beamforming*. Signal Processing Letters, IEEE, vol. 10, no. 6, pages 172–175, 2003.
- [Swindlehurst 1992] A.L. Swindlehurst et T. Kailath. *A performance analysis of subspace-based methods in the presence of model errors. I. The MUSIC algorithm*. Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 40, no. 7, pages 1758–1774, 1992.
- [Tong 2006] P.B. Tong, S.H. Lim, S.C. Chia et J.-M. Passerieux. *Extended Towed Array Measurement : Beam-domain phase estimation and coherent summation*. In OCEANS 2006-Asia Pacific, pages 1–6. IEEE, 2006.
- [Urlick 1983] R.I. Urlick. *Principles of underwater acoustics*. McGraw-Hill, New York, 1983.
- [Valin 2007] J.-M. Valin, F. Michaud et J. Rouat. *Robust localization and tracking of simultaneous moving sound sources using beamforming and particle filtering*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 55, no. 3, pages 216–228, 2007.
- [Van Veen 1988] B.D. Van Veen et K.M. Buckley. *Beamforming : a versatile approach to spatial filtering*. ASSP Magazine, IEEE, vol. 5, no. 2, pages 4–24, 1988.

- [Vertatschitsch 1986] E. Vertatschitsch et S. Haykin. *Nonredundant arrays*. Proceedings of the IEEE, vol. 74, no. 1, pages 217–217, 1986.
- [Viberg 1991] M. Viberg et B. Ottersten. *Sensor array processing based on subspace fitting*. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 39, no. 5, pages 1110–1121, 1991.
- [Vincent 2004] F. Vincent et O. Besson. *Steering vector errors and diagonal loading*. In Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, volume 151, pages 337–343. IET, 2004.
- [Von Karman 1948] T. Von Karman. *Progress in the statistical theory of turbulence*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 34, no. 11, page 530, 1948.
- [Wagstaff 1973] R. A. Wagstaff. *RANDI : Research Ambient Noise DIrectionality model*. Rapport technique, Naval Undersea Center, 1973.
- [Wales 2002] S.C. Wales et R.M. Heitmeyer. *An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 111, no. 3, pages 1211–1231, 2002.
- [Wang 2004a] Y. Wang, J. Li, P. Stoica, M. Sheplak et T. Nishida. *Wideband RELAX and wideband CLEAN for aeroacoustic imaging*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 115, page 757, 2004.
- [Wang 2004b] Z. Wang, J. Li, P. Stoica, T. Nishida et M. Sheplak. *Constant-beamwidth and constant-powerwidth wideband robust Capon beamformers for acoustic imaging*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 116, page 1621, 2004.
- [Williams 1969] J. E. F. Williams et D. L. Hawkings. *Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion*. Philosophical Transactions of The Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 264, pages 321–342, 1969.
- [Williams 1976] R.E. Williams. *Creating an acoustic synthetic aperture in the ocean*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 60, no. 1, pages 60–73, 1976.
- [Williams 1999] E.G. Williams. *Fourier acoustics : sound radiation and nearfield acoustical holography*. Academic Press, 1999.
- [Yardibi 2008] T. Yardibi, J. Li, P. Stoica et L. N. Cattafesta III. *Sparsity constrained deconvolution approaches for acoustic source mapping*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, no. 5, pages 2631–2642, 2008.
- [Yardibi 2010] T. Yardibi, J. Li, P. Stoica, N.S. Zawodny et L.N. Cattafesta III. *A covariance fitting approach for correlated acoustic source mapping*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 127, no. 5, pages 2920–2931, 2010.
- [Yen 1989] N.-C. Yen et W. Carey. *Application of synthetic-aperture processing to towed-array data*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 86, no. 2, pages 754–765, 1989.

Résumé — Le bruit rayonné par le trafic maritime étant la principale source de nuisance acoustique sous-marine dans les zones littorales, la Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin de la Commission Européenne promeut le développement de méthodes de surveillance et de réduction de l'impact du bruit du trafic maritime. Le besoin de disposer d'un système industriel d'imagerie du bruit rayonné par les navires de surface a motivé la présente étude, il permettra aux industriels du naval d'identifier quels éléments d'un navire rayonnent le plus de bruit.

Dans ce contexte, ce travail de recherche porte sur la mise en place de méthodes d'imagerie acoustique sous-marine passive d'un navire de surface au passage au-dessus d'une antenne linéaire et fixe au nombre réduit d'hydrophones. Deux aspects de l'imagerie acoustique sont abordés : la localisation de sources acoustiques et l'identification de la contribution relative de chacune de ces sources dans la signature acoustique du navire.

Tout d'abord, une étude bibliographique sur le rayonnement acoustique d'un navire de surface au passage est menée afin d'identifier les principales sources acoustiques et de pouvoir ensuite simuler des sources représentatives d'un navire. La propagation acoustique est simulée par la théorie des rayons et intègre le mouvement des sources. Ce simulateur de rayonnement acoustique de navire au passage est construit afin de valider les algorithmes d'imagerie acoustique proposés et de dimensionner une configuration expérimentale. Une étude sur l'influence du mouvement des sources sur les algorithmes d'imagerie acoustique a conduit à l'utilisation d'un algorithme de formation de voies pour sources mobiles pour la localisation des sources et une méthode de déconvolution pour accéder à l'identification de la contribution des sources. Les performances de ces deux méthodes sont évaluées en présence de bruit de mesure et d'incertitudes sur le modèle de propagation afin d'en connaître les limites. Une première amélioration de la méthode de formation de voies consiste en un traitement d'antenne à ouverture synthétique qui exploite le mouvement relatif entre le navire et l'antenne pour notamment améliorer la résolution en basses fréquences. Un traitement de correction acoustique de la trajectoire permet de corriger la trajectographie du navire au passage qui est souvent incertaine. Enfin, la dernière partie de cette thèse concerne une campagne de mesures de bruit de passage d'une maquette de navire de surface tractée en lac, ces mesures ont permis de valider les méthodes d'imagerie acoustique proposées ainsi que les améliorations proposées, dans un environnement réel maîtrisé.

Mots clés : Imagerie acoustique, acoustiques sous-marine, acoustique navale, formation de voies, sources mobiles, bruit de passage, navire de surface, antenne à ouverture synthétique, déconvolution de la formation de voies, contribution de sources

Abstract — Since the surface ship radiated noise is the main contribution to the underwater acoustic noise in coastal waters, The Marine Framework Strategy Directive of the European Commission recommends the development of the monitoring and the reduction of the impact of the traffic noise. The need for developing an industrial system for the noise mapping of the surface ship have motivated this study, it will allow the naval industries to identify which part of the ship radiates the stronger noise level.

In this context, this research work deals with the development of passive noise mapping methods of a surface ship passing-by above a static linear array with a reduced number of hydrophones. Two aspects of the noise mapping are considered : the localization of acoustic sources and the identification of the relative contribution of each source to the ship acoustic signature. First, a bibliographical study concerning the acoustic radiation of a passing-by surface ship is conducted in order to list the main acoustic sources and then to simulate representative ship sources. The acoustic propagation is simulated according to the ray theory and takes the source motion into account. The simulator of the acoustic radiation of a passing-by ship is built in order to validate the proposed noise mapping methods and to design an experimental set-up. A study about the influence of the source motion on the noise mapping methods led to the use of the beamforming method for moving sources for the source localization and a deconvolution method for the identification of the source contribution. The performances of both methods are assessed considering measurement noise and uncertainties about the propagation model in order to know their limitations. A first improvement of the beamforming method consists of a passive synthetic aperture array algorithm which benefits from the relative motion between the ship and the antenna in order to improve the spatial resolution at low frequencies. Then, an algorithm is proposed to acoustically correct the trajectography mismatches of a passing-by surface ship. Finally, the last part of this thesis concerns a pass-by experiment of a towed-ship model in a lake. These measurements allowed us to validate the proposed noise mapping methods and their proposed improvements, in a real and controlled environment.

Keywords : Noise mapping, underwater acoustics, naval acoustics, beamforming, moving sources, pass-by noise, surface ship, synthetic aperture array, deconvolution of beamforming results, source contribution

Laboratoire Grenoble Image Parole Signal et Automatique
Université Grenoble Alpes
Grenoble Campus BP46
F-38402 SAINT MARTIN D'HÈRES CEDEX